DESEI+D 2026

Libro de resúmenes comunicaciones DESEi+d 2026



MINISTERIO
DE DEFENSA



DESEI+D'2026

XIII Congreso Nacional de i + d en Defensa y Seguridad

Alicante
17, 18 y 19 de noviembre de 2026

Libro de resúmenes comunicaciones

MINISTERIO
DE DEFENSA

DESEI+D'2026

XIII Congreso Nacional de i + d en Defensa y Seguridad

Resúmenes

Organiza

Con la participación

PALACIO DE CONGRESOS ALICANTE

Patrocina

isdefe

Catálogo de Publicaciones de Defensa
publicaciones.defensa.gob.es

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado
cpage.mpr.gob.es

Imagen de cubierta: Castillo de Santa Bárbara situado en lo alto del monte Benacantil, junto al puerto y la ciudad de Alicante.

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA
SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autores y editor, 2026

NIPO 083-26-293-X (edición impresa)
ISBN 978-84-1083-193-3 (edición impresa)

NIPO 083-26-294-5 (edición en línea)

Depósito legal M 25037-2026
Fecha de edición: octubre de 2026
Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

Las opiniones emitidas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor de la misma. Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del copyright ©.

En esta edición se ha utilizado papel procedente de bosques gestionados de forma sostenible y fuentes controladas.

Esta publicación se distribuye bajo licencia CC BY-NC-ND 4.0 que permite compartir el material en cualquier medio o formato con la condición de reconocer adecuadamente la procedencia «Edita: Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica». No se puede modificar. No se puede utilizar con fines comerciales.

publicaciones.defensa.gob.es
cpage.mpr.gob.es

Índice

Presentación libro de resúmenes DESEi+d 2026 21

ÁREA 1. Armas y municiones 23

1.1 Letalidad de precisión y alcance extendido 25

115 – Influencia de la geometría de las aletas y de la longitud del cuerpo en el comportamiento aerodinámico de cohetes subsónicos 27

1.2 Sistemas avanzados y municiones inteligentes 29

143 – Análisis de estrategias de control aplicadas a proyectiles con guiado láser semiactivo 31

207 – Fabricación y comportamiento a fractura de propulsantes sólidos HTPB/aluminio/perclorato amónico 33

210 – Proyectiles 9 x 19 mm como dispositivos de un solo uso: test de vida acelerado 35

240 – Simulación numérica del proceso de fabricación de propulsantes sólidos compuestos 37

100 – *Red phosphorus as additive for rocked propellant* 39

1.3 Tecnologías y aplicaciones específicas para armamento 41

98 – CERAUXET: investigación y desarrollo de estructuras auxéticas de polietileno como backing y soporte de cerámicas de alto rendimiento obtenidas por nuevos procesos 43

269 – Sistema C-UAS optrónico-láser de potencia media basado en reutilización de tecnología LWDED y fabricación aditiva: prototipo dual de neutralización graduada de drones clase I 45

Área 2. SENSORES Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS 49

2.1 Tecnologías electrónicas 51

50 – Evaluación electromagnética de materiales para fabricación aditiva de radomos: transparencia, rugosidad y comportamiento en servicio 53

61 – Arquitectura cuádruple para receptores ULA en tecnología CMOS 65 nm 55

99 – Estabilidad de las emisiones EMI conducidas en convertidores DC-DC GaN bajo irradiación ionizante: caracterización *in situ* 57

2.2 Radar 59

56 – Caracterización de la sección radar de grandes plataformas con metasuperficies de baja observabilidad mediante modelado a escala 61

146 – Optimización de la detectabilidad de mini-UAV en radar pasivo DVB-T mediante *beamforming* MRC e integración coherente extendida de banda ancha 63

2.3 Sensores y sistemas optrónicos 65

127 – Desarrollo de un sensor de imagen LiDAR 3D de largo alcance para la detección y seguimiento de amenazas aéreas de baja observabilidad 67

187 – Emisiones de radiación infrarroja de un motor de avión de combate: SAF frente a combustible convencional 69

2.5 Tecnologías PNT y sensores emergentes 71

241 – Evaluación del posicionamiento con señales de satélites de oportunidad (SATSOO) en el entorno naval 73

62 – ISNAV: sistema de navegación vehicular con capacidades *antispoofing* GNSS 75

71 – Proyecto ENASUS: generación de atmósferas contaminadas para la caracterización de sensores MO 77
73 – Proyecto ENASUS: combustión catalítica en sensores MO 79

2.6 Computación, fusión y procesamiento de datos de sensores 81

10 – Transitabilidad desde imágenes RGB de drones. Predicción de la profundidad y los obstáculos por modelos multimodales 83
4 – Clasificación de combustibles forestales mediante teledetección y aprendizaje automático en áreas militares mediterráneas 85
89 – Seguimiento de objetivos y evaluación de amenazas con compensación de ego-movimiento para vigilancia aérea con UAV 87
136 – Detección de humanos y objetos para la cubierta forestas con LiDAR y redes neuronales profundas 89
165 – Detección de anomalías en datos AIS mediante aprendizaje no supervisado para apoyo a la vigilancia marítima: revisión del estado del arte y propuesta metodológica para operaciones de seguridad en aguas españolas 91
205 – Reconocimiento de armas de fuego por su firma de audio vía la adaptación y ajuste de modelos fundacionales de audio con escasos datos 93
218 – Aplicación y uso de la tecnología de sensado acústico distribuido con pulsos chirpados para monitorizar infraestructuras críticas submarinas 95

2.8 Guerra electrónica 97

7 – *Spoofing* de señales AIS desde submarinos y sistemas no tripulados: una capacidad emergente de decepción operativa 99
28 – Grados de libertad en sistemas CRPA: menos elementos no siempre es menos protección 101
31 – Detección por radiofrecuencia de drones DJI y enlaces LoRa: análisis de señal y capacidades operativas 103
128 – Perfilado táctico de dispositivos inalámbricos para defensa perimetral 105
185 – Aplicación de redes generativas antagónicas (GAN) sobre espectrogramas de RF en escenarios de guerra electrónica 107

Área 3. TECNOLOGÍAS COMUNES A SISTEMAS DE DEFENSA 109

3.1 Ciclo de vida 111

76 – Gestión de la corrosión atmosférica en entornos militares: mecanismos, mitigación y sostenibilidad operativa 113

85 – La economía circular como vector emergente en los materiales avanzados para el sector defensa: perspectiva nacional desde el punto de vista de la plataforma tecnológica MATERPLAT 115

154 – Toma de decisiones de sostenimiento utilizando IA generativa en entornos *on-premise* 117

157 – Avances en la monitorización del estado de aeronaves: detección de la emisión acústica asociada a mecanismos de corrosión 119

220 – Termografía inteligente para el mantenimiento predictivo de lubricantes en vehículos pesados de interés para la Defensa 121

236 – Modelado predictivo de corrosión en aceros navales mediante aprendizaje automático: plataforma Kimiko para el mantenimiento inteligente de buques 123

3.2 Materiales 125

15 – Método para la evaluación de la protección otorgada por un blindaje mediante el ensayo de V50 127

33 – Desarrollo de recubrimientos anticorrosivos de última generación para la protección de plataformas en ambientes agresivos 129

34 – Caracterización electromagnética y microestructural del polvo Ti-6Al-4V para el diseño de metamateriales mediante fabricación aditiva 131

68 – Efecto de la turbulencia en la respuesta a corrosión de bronces de elevada aleación en medios marinos contaminados con azufre 133

79 – Identificación y caracterización de impactos en aeroestructuras de material compuesto mediante técnicas de emisión acústica 135

87 – Los metamateriales y sus revolucionarias aplicaciones multifuncionales 137

150 – Selección y optimización de materiales en componentes críticos operativos: estudio aplicado a barras de torsión en plataformas militares 139

156 – Soluciones innovadoras de fabricación aditiva para Defensa..... 141
171 – *Composites* basados en resinas biobasadas y reciclables para aplicaciones de altas prestaciones..... 143
175 – Materiales compuestos autocurables con dualidad sensor-actuador para plataformas aéreas militares: un marco de transferencia tecnológica desde aerogeneradores a fuselajes de Defensa..... 145
186 – Optimización de la cadena de posprocesado en fabricación aditiva metálica: hacia la autonomía logística y la integridad estructural en operaciones de Defensa..... 147
213 – Reducción de firma térmica en unidades militares: desarrollo de materiales de bajo coste para la mitigación de la detección infrarroja en escenarios de conflicto contemporáneo..... 149
235 – Diseño asistido por IA de composites reciclables y autorreparables para plataformas de defensa: vitrímeros y polímeros para fibra de vidrio..... 151
242 – Fabricación utilizando técnicas híbridas LPBF + LW DED..... 153

3.3 Energía..... 155

30 – Del soldado al sistema no tripulado: evolución del almacenamiento energético basado en aluminio-aire..... 157
47 – Producción de combustibles estratégicos para las Fuerzas Armadas a partir de NFU: un modelo para la resiliencia energética y la defensa nacional..... 159
59 – Nanotecnología: un pilar estratégico para la autonomía energética y la geopolítica de los metales críticos..... 161
84 – Del concepto al demostrador tecnológico: hacia un almacenamiento energético inteligente para la defensa europea (NOMAD)..... 163
134 – Centro de gestión de energía móvil, multifuente y con capacidad integrada de vigilancia..... 165
159 – PULSMES: desarrollo de un sistema pulsado de alta potencia basado en SMES..... 167
180 – Aplicación de la inteligencia artificial en la gestión de energía..... 169
233 – Recuperación de energía termoeléctrica integrada en textiles inteligentes para la monitorización de salud del combatiente..... 171

246 – Baterías de flujo: almacenamiento energético para campamentos militares 173
259 – Producción de combustible sintético a partir de residuos de hidrocarburos de buques de la Armada 175

3.4 Logística 177

36 – Hacia una Europa de la defensa: integración y trabajo en equipo entre operadores logísticos civiles y Fuerzas Armadas a través de una red federada de información logística *(fedlogit network)* 179
63 – Un modelo de optimización para la planificación de operación y mantenimiento de una flota de aeronaves 181
145 – Robótica de intervención directa y manipulación flexible para mantenimiento asistido de equipamiento en entornos de defensa 183
221 – Sistema inteligente de apoyo a la decisión logística para la seguridad del personal en tareas críticas de Defensa 185
228 – LUNA: optimización logística federada con aprendizaje por refuerzo profundo y gemelo digital para la resiliencia de la cadena de abastecimiento en defensa 187
263 – Sistema modular aerotransportable para fabricación avanzada *in situ* en mantenimiento aeronáutico 189
265 – Soluciones de reparación mediante fabricación aditiva para sistemas de combustible del F-18 191
277 – Empleo de técnicas SLM/DED para el soporte logístico de componentes metálicos críticos de armas en teatro de operaciones 193

Área 4. BASES E INSTALACIONES 195

4.2 Energía en bases e instalaciones 197

54 – Contenedores de vida en bases militares: ¿cómo hacer más económica su eficiencia energética? 199
140 – Soluciones avanzadas de climatización y gestión térmica para la mejora de la eficiencia energética y la resiliencia operativa en infraestructuras militares 201

4.3 Modernización bases e instalaciones 203

151 – Arquitectura de referencia para una base aérea conectada, sostenible e inteligente: automatización, resiliencia, ciberseguridad y conciencia situacional en entornos de uso dual 205

Área 5. PLATAFORMAS TERRESTRES 207

5.4 Robótica terrestre 209

75 – *Framework* para mejora de las funcionalidades de navegación e independencia táctica de plataformas terrestres autónomas en condiciones degradadas 211

137 – Sistemas autónomos cooperativos duales con percepción y navegación resiliente en entornos degradados y hostiles 213

149 – Kit autónomo embarcable para robótica en entornos subterráneos hostiles: SLAM multimodal, percepción avanzada y comunicaciones resilientes para rescate 215

Área 6. PLATAFORMAS NAVALES 217

6.1 Diseño de plataformas navales 219

26 – Optimización orientada a misión de una fragata DTMB mediante predicción IA del comportamiento en la mar y evaluación masiva de operatividad 221

66 – Análisis hidroelástico totalmente acoplado de buques, acelerado mediante técnicas de reducción de la matriz modal 223

6.2 Control, energía y propulsión naval 225

46 – Viabilidad de la integración de sistemas de captura de CO2 poscombustión en plataformas navales de defensa 227

166 – Estudio experimental de reducción de resistencia por microburbujas en el canal de aguas tranquilas 229

173 – Novedoso montaje experimental para estudios de viscosidad en el ámbito naval 231

248 – *Dual-use validation infrastructure for small-scale marine energy converters: naval applications of the MED-Hubs testbed* (Cartagena, Spain) 233

6.4 Vehículos marinos no tripulados 235

40 – SWATSHOAL: un enfoque de sistema-de-sistemas para operaciones colaborativas de enjambres submarinos 237

52 – Plataforma modular *hardware-software* para el despliegue de enjambres de USV en misiones marítimas complejas 239

Área 7. PLATAFORMAS AÉREAS 241

7.2 Energía y propulsión 243

43 – Diseño y fabricación de una tobera *aerospike* mediante fabricación aditiva 245

80 – Nueva instalación de ensayo de toberas de aerorreactores de la Universidad Politécnica de Madrid para aplicaciones de defensa 247

107 – Mejora de la eficiencia de hélices a bajos números de Reynolds mediante el uso de generadores de vórtices 249

113 – Importancia de las condiciones de contorno de cavidades con combustión en la predicción del desarrollo de inestabilidades termoacústicas 251

129 – Análisis de sensibilidad de la combustión en motores diésel de cuatro tiempos con mezclas diésel-hidrógeno y diésel-metanol 253

214 – Estudio de autoignición en capas de mezcla supersónicas H2-Aire para motores SCRamjet 255

7.3 Sistemas integrados en plataformas aéreas 257

19 – Análisis de la operativa de helicópteros militares en plataformas navales *offshore* 259

7.4 UAS 261

70 – Desarrollo integral y validación de sistemas de control y guiado para UAV basados en MPC: desde la simulación hasta su implementación embarcada en aplicaciones C-UAS 263

102 – Desarrollo de un entorno de misiones colaborativas multi-UAV aplicadas a la extinción de incendios 265
109 – Navegación de UAV en entornos GNSS denegados: diseño y validación operativa de un sistema visual inercial embarcado 267
116 – Guiado navegación y control para interceptores contra UAS, estrategia y diseño 269
118 – Vuelo en formación de UAV: estrategias, desafíos y aplicaciones para operaciones en entornos complejos 271
138 – Estimación de riesgo en tierra para UAS en tiempo cuasirreal mediante modelado eficiente del cono de caída 273
194 – Determinación de las trayectorias de ascenso de globos estratosféricos para la interceptación de globos espía 275
200 – Implementación de técnicas de fabricación 3D y prototipado de RPAS 277
234 – Diseño de una arquitectura SafeRL multiagente para la escolta de unidades terrestres mediante enjambres de UAV 279
283 – Estudio experimental de configuraciones bioinspiradas para RPAS a bajo Reynolds 281

Área 8. SISTEMAS ESPACIALES 283

8.2 Comunicaciones SATCOM 285

45 – Comunicaciones tácticas UHF desde constelaciones LEO 287
119 – Diseño, desarrollo y escalado industrial de antenas activas reconfigurables multihaz de segmento espacial para comunicaciones seguras en constelaciones LEO 289
237 – Integración de antenas conformables impresas y embebidas en estructuras de material compuesto para vehículos aéreos autónomos de defensa 291
251 – Arquitectura criptoágil para comunicaciones satelitales seguras: integración de criptografía poscuántica y distribución cuántica de claves en entornos de Defensa 293
252 – Hacia unas comunicaciones militares por satélite resilientes frente a la computación cuántica: corrección adaptativa de errores para QKD satelital sobre enlaces de conexión ópticos en espacio libre 295

8.3 Inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) 297

155 – Capacidades SIGINT y monitorización del espectro mediante satélites SDR: validación operativa de la plataforma SATMAR 299

197 – Protección de activos espaciales frente a maniobras de aproximación 301

198 – Identificación temprana de trayectorias en operaciones de lanzamientos 303

8.5 Otras aplicaciones espaciales para Defensa 305

32 – Seguridad espacial: transfiriendo escombros espaciales de la órbita geoestacionaria a una órbita cementerio 307

Área 9. COMBATIENTE 309

9.1 Sistema combatiente y sanidad militar 311

201 – Entrenamiento y adiestramiento continuado a través de realidad aumentada de aeroevacuaciones para el personal sanitario 313

17 – Evolución de la tecnología de exoesqueletos en España: del proyecto GUDEX a los sistemas híbridos inteligentes para mantenimiento y logística militar 315

9.2 Factores humanos 317

93 – Influencia del diseño del calzado en la fatiga y el rendimiento del usuario en entornos operativos 319

94 – Neuromonitorización en avión de combate: estudio de viabilidad en pilotos de F-18 en entorno operacional 321

96 – Monitorización y análisis multimodal de la carga mental mediante neurotecnología e inteligencia artificial en aviación militar 323

170 – Metodología integral para mitigar la exposición a ruido y vibraciones en plataformas militares 325

191 – Estudio piloto de análisis biomecánico de la marcha (con y sin carga) de sujetos de los cuerpos de seguridad del Estado 327

209 – Evaluación de la carga cognitiva de pilotos militares mediante potencia theta EEG, estudio experimental en simulador avanzado 329
211 – Tiempos de respuesta y rendimiento cognitivo en entornos de instrucción naval en la ENM: implicaciones operativas 331
222 – Soluciones no invasivas, conectadas y predictivas para la monitorización de la salud del combatiente en tiempo real 333
245 – Garantizando la seguridad operacional: arquitectura de un predictor en cuasitiempo real para interfaces multimodales de *silent speech* 335
258 – Neurociencia cognitiva aplicada a la formación y evaluación de operadores HUMINT a través de simulación VR+AI+sensores 337
264 – Guías técnicas para el análisis de la confianza del piloto en la automatización en entornos aeronáuticos militares altamente automatizados 339
270 – Apósitos inteligentes para la monitorización del combatiente: sensórica impresa, sistemas embebidos e inteligencia artificial para medicina táctica avanzada 341
281 – EXOEPI - Exoesqueleto de calzado para la asistencia del personal de emergencias 343

Área 10. NRBQe 345

10.1 Tecnologías para C-IED 347

148 – Robótica móvil para la toma remota de muestras en entornos contaminados con aplicación dual defensa-civil 349
239 – Caracterización experimental del impacto de dispositivos omnidireccionales de proyección de agua contra IED mediante deformación de blancos metálicos 351
274 – Sistema GPR multiestático embarcado en UAV para la detección de minas terrestres y artefactos explosivos improvisados 353

10.2 Defensa NRBQ 355

11 – Metodología sintética y purificación de compuestos relacionados con la lista S1.A.13 de la Convención sobre las Armas Químicas (CAQ) .. 357

24 – Arquitectura *hardware* de IA embebida para la detección en tiempo real de amenazas radiológicas y nucleares en el borde táctico 359
41 – RAPID-VAC: plataforma nacional de vacunas de RNA para respuesta rápida y escalable frente a amenazas biológicas de interés para la defensa en salud 361
42 – Diagnóstico molecular avanzado de despliegue rápido y autonomía industrial: tecnología qPCR de alto multiplexado para defensa en salud 363
82 – Implementación de herramientas de biología computacional e inteligencia artificial en el diseño de un biorreceptor para la identificación de saxitoxina 365
92 – Plasma frío como tecnología portátil para la descontaminación de aguas en aplicaciones duales defensa-civil 367
122 – Caracterización fisicoquímica y farmacotécnica de la obidoxima como principio activo estratégico en la fabricación industrial de un antídoto frente a agentes organofosforados 369
162 – ATALAYA: Red de Excelencia para el Fortalecimiento de Capacidades Tecnológicas en Detección y Protección NRBQ frente a Amenazas Asimétricas 371
168 – Avances en biosensado genético y fotónico para la detección temprana de amenazas biológicas: una aproximación desde la Red ATALAYA 373
174 – *Pipeline* de inteligencia artificial para el diseño de novo de enzimas descontaminantes de agentes NRBQ 375
176 – Monitorización inteligente de filtros basados en *metal-organic frameworks* para protección colectiva NRBQ: marco conceptual de gemelo digital con predicción de vida útil residual 377
178 – Diseño computacional de *metal-organic frameworks* multifuncionales para neutralización simultánea de amenazas NRBQ mediante optimización multiobjetivo 379
179 – *Transfer learning* multifidelidad para predicción del rendimiento de *metal-organic frameworks* en defensa NRBQ: de datos de simulantes a agentes químicos de guerra reales 381
195 – Desarrollo galénico de formulaciones semisólidas frente a agentes físicos y nucleares 383

196 – Desarrollo galénico de formulaciones semisólidas frente a agentes químicos 385
238 – Protección frente a aerosoles o humo mediante agregación dinámica 387
254 – De hidrocarburos aromáticos a mezclas complejas: sellado de suelos contaminados mediante bioingeniería y bioadsorbentes 389

Área 11. TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN 391

11.1 Sistemas de información para C4I 393

104 – Integración de vídeo táctico STANAG 4609 para la mejora de la conciencia situacional 395
158 – Nube táctica de combate para inteligencia geoespacial: IA embarcada en entornos desplegados sin conectividad para análisis multidominio de imágenes satelitales 397
202 – Fusión multisensor heterogénea e inteligencia artificial explicable para la detección y seguimiento predictivo de embarcaciones de alta velocidad en USV interceptadores 399
230 – ARGO: asistencia al operador en campo mediante IA embarcada autónoma para operaciones de inteligencia sin infraestructura de red 401
231 – OLYMPUS: sistema de inteligencia de ciclo completo – integración de captura autónoma en campo y análisis central con IA para operaciones de Defensa 403
255 – Cómputo orbital distribuido para C4ISR autónomo 405
13 – *Crossbond* - Conectividad, interoperabilidad y C2 entre plataformas aéreas 407

11.2 Comunicaciones tácticas 409

51 – Desarrollo de un sistema de mensajería táctica resiliente sobre redes malladas LoRa-Meshtastic para entornos navales de instrucción .. 411
53 – Diseño e implementación de un sistema de comunicaciones aire-aire robusto frente a interferencias intencionadas 413

193 – Optimización del despliegue inicial de redes tácticas de telecomunicaciones multitecnología 415

11.3 Simulación 417

6 – Modelos de combate: la evolución necesaria 419

14 – Controlando lo que no se puede medir: *deep learning surrogate models* y *reinforcement learning* para la regulación autónoma del vacío en el prototipo MuVacAS de IFMIF-DONES 421

39 – Ingeniería de sistemas para gemelos digitales en la optimización del ciclo de vida de activos y plataformas 423

103 – Instrucción militar básica en concepto de Seguridad Interior mediante simulación virtual interactiva 425

106 – Análisis de sistemas de última generación para simulación multidominio, aplicado al entrenamiento «War Room» en operaciones aeroespaciales 427

108 – Gemelo digital para hélices de alto y bajo número de Reynolds 429

204 – Aceleración de simuladores marítimos mediante redes físicamente informadas y operadores neuronales para entrenamiento y validación SIL/HIL de sistemas de IA embarcada 431

227 – *Fast Wargaming* – Modelos subrogados para la aceleración del *wargaming* militar 433

273 – Desarrollo y validación de un simulador genérico 6-DOF y arquitecturas GNC para el diseño preliminar de proyectiles balísticos e hipersónicos 435

11.4 Seguridad de sistemas e información 437

3 – Agentes autónomos de inteligencia artificial en operaciones cibernéticas ofensivas: técnicas, integración doctrinal e implicaciones éticas para las Fuerzas Armadas 439

60 – Modelo estadístico de Bernoulli aplicado a las respuestas de funciones no clonables físicamente (PUF) en seguridad *hardware* 441

64 – Energía táctica y ciberseguridad. Necesidades operativas, riesgos emergentes y transferencia tecnológica sectorial 443

74 – Sistemas reales adaptativos de engaño táctico y detección temprana para generación de inteligencia de amenazas y ciberaprendizaje ofensivo/defensivo 445
81 – D²-BALUARTE: supervisión avanzada de sistemas auxiliares críticos mediante inspección profunda de protocolos y gemelos digitales en el buque de guerra 447
120 – Evaluación de la robustez de modelos de detección de objetos en vehículos marinos semiautónomos 449
189 – El ciberoperador militar: perfil doctrinal para el combatiente de ciberdefensa español 451
192 – Arquitectura multiagente soberana para análisis forense verificable en ciberdefensa 453
250 – SEPCIA: sistema de evaluación de protocolos criptográficos asistido por inteligencia artificial generativa 457
260 – SACIA: sistema de auditoría de ciberseguridad asistido por inteligencia artificial 459
261 – UMBRA: protección y supervisión de enlaces RS485/Modbus RTU en sistemas auxiliares críticos de buques de guerra 461

11.5 Aplicación a Defensa de avances en tecnologías TIC 463

111 – Sistemas multiagente híbridos LLM-SLM con coordinación distribuida en entornos tácticos 465
112 – Estudio de implantación de un sistema de gestión de inteligencia artificial conforme a ISO/IEC 42001 en el Centro de Tecnologías Emergentes del Ejército de Tierra (CTEET) 467
160 – Soberanía tecnológica en plataformas de IA para Defensa: reentrenamiento de modelos de análisis de imágenes satelitales con datos militares soberanos 469
172 – Generación sintética de defectos en imágenes de placas de acero para aplicaciones de Defensa combinando modelos de visión fundacionales y de difusión latente generativos 471
203 – Sistema autónomo para la interceptación marítima de embarcaciones de alta velocidad con USV mediante *deep reinforcement learning* multiagente 473

224 – BELLONA: sistema multiagente con modelos de lenguaje para la generación automatizada de Cursos de Acción militares 475
244 – TSAS-M: hacia una analítica de próxima generación mediante arquitecturas agénticas y el protocolo MCP 477
49 – Sistemas de tiempo real tolerantes a fallos mediante KAN: del problema de la caja negra a la certificación y gobernanza en proyectos de defensa 479

Área 12. SOCIEDAD, ECONOMÍA Y HUMANIDADES 481

12.1 Modelos socioeconómicos / Economía y política industrial 483

215 – Heterogeneidad competitiva, innovación y autonomía estratégica en la base industrial europea de defensa: evidencia microeconómica para la UE27 485

12.2 Instrucción y educación 487

212 – Entropía bélica y fricción y clausewitziana: un modelo cuantitativo para medir el poder militar en entornos de información 489

12.3 Geografía, política y derecho 491

18 – La cultura de defensa ante los nuevos retos de la inteligencia artificial 493
117 – La siguiente frontera geopolítica: el espacio 495

PRESENTACIÓN LIBRO
RESÚMENES DESEi+d 2026

La XIII edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad de este año 2026 se celebra durante los días 17, 18 y 19 de noviembre en el Palacio de Congresos de Alicante perteneciente al Colegio de Médicos. La organización de la edición de este congreso corresponde a la Subdirección General de Planificación Tecnología e Innovación (SDG PLATIN) de la Dirección General de Estrategia e Innovación de Industria de la Defensa (DGEID), junto con la Subdirección General de Enseñanza Militar (SDG EM) de la DIGEREM y contando con el apoyo de los Centros Universitarios de la Defensa e ISDEFE.

La elección de esta ubicación responde, además, a uno de los objetivos de la Política de I+D+i del MINISDEF que persigue promover el máximo conocimiento de las necesidades tecnológicas de las FAS en todo el territorio nacional, así como lograr el mayor grado de participación de todo tipo de entidades (universidades, centros de investigación e industria) de todas las CC. AA. españolas en su consecución.

En línea de las ediciones anteriores, el DESEi+d se presenta como un foro y punto de encuentro de todos los agentes relacionados con la I+D+i en el ámbito de la defensa y la seguridad, donde tendrán la oportunidad de presentar y difundir los resultados de las últimas investigaciones y trabajos realizados en alguna de las áreas temáticas relacionadas con la defensa y seguridad.

La estructura del congreso consta de una mesa plenaria de alto nivel cada uno de los tres días, en la que intervienen destacados representantes de

organismos y entidades públicas y privadas con responsabilidades en I+D+i, de la que se puedan obtener orientaciones de interés en relación con aspectos cruciales para el presente y el futuro de la I+D+i de aplicación a defensa y seguridad y la presentación de las comunicaciones presentadas en aulas en paralelo cada uno de los días de celebración del Congreso.

Dado el éxito de ediciones anteriores de este Congreso, seguiremos contando con un espacio específico dedicado a la innovación, contribuyendo de esta manera a los esfuerzos que se están realizando tanto a nivel nacional como internacional en el impulso a la innovación y la creación junto a FEINDEF de un premio de innovación en el ámbito de las Fuerzas Armadas, que será entregado en uno de los días del Congreso.

En este libro, como en las ediciones anteriores, se exponen los resúmenes de las comunicaciones presentadas y aprobadas por revisión por pares, agrupadas según las doce diferentes áreas temáticas del Congreso.

El creciente interés y nivel de participación en las ediciones anteriores, así como la realidad actual en la que la componente tecnológica previsiblemente jugará un papel central en el ámbito de seguridad y defensa, hacen que de nuevo podamos esperar interesantes y valiosas contribuciones de todos los ponentes y asistentes al Congreso.

Desde el Comité Organizador, queremos agradecer a todos ustedes su participación y asistencia, deseándoles el máximo aprovechamiento de esta nueva edición del DESEi+d.

Comité organizador DESEi+d 2026

ÁREA 1

Armas y municiones

1.1
Letalidad de precisión y alcance extendido

115 – Influencia de la geometría de las aletas y de la longitud del cuerpo en el comportamiento aerodinámico de cohetes subsónicos

Autores: Molinelli Manini, Gonzalo[1]; López Sánchez, Raúl[2]; Ianiro, Andrea[3]

Resumen: El presente trabajo analiza el comportamiento aerodinámico y la estabilidad de cohetes subsónicos estabilizados mediante aletas. Para ello, se adopta un enfoque integrado basado en métodos semiempíricos y simulación numérica, complementado con simulaciones de vuelo para una validación global del sistema. La caracterización aerodinámica ha permitido obtener coeficientes de fuerza y momento en función del ángulo de ataque y del régimen de vuelo, así como los márgenes de estabilidad en el rango subsónico. En particular, se ha estudiado el efecto del número de aletas y de la longitud del cohete sobre la posición del centro de presiones y su relación con el centro de gravedad. Los resultados presentados muestran que el número de aletas constituye el parámetro dominante en la generación de fuerzas y momentos; mientras que el aumento de la longitud del fuselaje favorece el desplazamiento del centro de presiones hacia posiciones más retrasadas, incrementando la estabilidad estática. El

[1,2] INTA.
[3] Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

incremento de estabilidad se ha traducido en una mayor robustez frente a perturbaciones, aunque con un impacto moderado en el rendimiento aerodinámico. Las simulaciones de vuelo han permitido verificar un entorno dinámico, confirmando la coherencia entre los modelos aerodinámicos y la respuesta global del sistema. En conjunto, el estudio pone de manifiesto la importancia de un diseño aerodinámico consistente y dimensionado para garantizar estabilidad y comportamiento predecible de cohetes subsónicos en condiciones de operación representativas.

Palabras clave: Aletas, Centro de presión, Cohetes subsónicos, Dinámica de vuelo, Estabilidad aerodinámica.

1.2
Sistemas avanzados y municiones inteligentes

143 – Análisis de estrategias de control aplicadas a proyectiles con guiado láser semiactivo

Autores: Ribalta, Mauro[1]; Carmona, Manuel[1]; López, Raúl[1]; Martínez Cava, Alejandro[2]

Resumen. Los recientes conflictos armados han evidenciado la creciente vulnerabilidad de los sistemas de navegación dependientes de GNSS frente a técnicas de denegación y *spoofing*, renovando el interés por alternativas de guiado terminal independientes de señal satelital. En este contexto, el guiado por láser semiactivo (SAL) se consolida como una solución robusta y probada en combate. El presente trabajo presenta el desarrollo de un simulador SAL de alta fidelidad implementado en MATLAB/Simulink, como plataforma de referencia para el estudio, desarrollo y validación de estrategias de guiado terminal para munición guiada de precisión equipada con sensores SAL en configuración gimbalizada y fija.

El simulador abarca una modelización precisa y detallada de todos los subsistemas implicados en el guiado terminal: el sensor SAL en todos sus estados de funcionamiento, la electrónica de procesamiento de señal,

[1] INTA.
[2] UPM.

la dinámica del proyectil y los actuadores de control. La caracterización del entorno óptico incorpora los efectos atmosféricos sobre la energía del haz láser, la reflexión sobre la superficie del blanco y el trazado de rayos, dotando al conjunto de la fidelidad necesaria para reproducir condiciones operacionales reales con alto grado de precisión. La plataforma permite estudiar y contrastar las principales estrategias de control de trayectoria aplicables durante la fase terminal, evaluando su comportamiento en función de la información disponible en el sensor en cada instante, con el objetivo de optimizar los parámetros de impacto –ángulo, tiempo de vuelo y precisión terminal– bajo distintas condiciones de operación y configuraciones de sensor. El entorno ha sido diseñado para soportar ejecución en tiempo real, habilitando la integración con *hardware* externo y ensayos *hardware-in-the-loop* (HIL) como paso previo a la cualificación de sistemas reales. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad del simulador como herramienta de desarrollo y ponen de relieve la influencia de la configuración del sensor sobre el rendimiento del guiado terminal, consolidándolo como base analítica para el diseño y certificación de futuros sistemas SAL en el ámbito de la defensa.

Palabras clave: Guiado, Control, Láser semiactivo, SAL, HIL.

207 – Fabricación y comportamiento a fractura de propulsantes sólidos HTPB/ aluminio/perclorato amónico

Autores: Chimeno Saavedra, David[1]; López Sánchez, Raúl[1]; Martínez, Mario[2]; Salazar, Alicia[2]; Rodríguez, Jesús[2]

Resumen. La producción soberana de propulsantes sólidos *composite* representa una capacidad estratégica a nivel nacional. En el contexto de una colaboración entre el INTA y la URJC, se desarrolla y valida una tecnología nacional que, en el presente manuscrito, permite presentar el desarrollo de un propulsante sólido basado en una matriz de HTPB, aluminio como combustible y perclorato amónico como oxidante. El objetivo principal de esta comunicación es la presentación de una validación de las principales propiedades mecánicas del motor, con especial énfasis en la tenacidad a fractura alcanzada en los prototipos del motor. Además, mediante técnicas reológicas y de análisis dinamomecánico, se ha investigado el efecto del agente de enlazado, la microestructura y las propiedades viscoelásticas del propulsante. Los resultados alcanzados muestran cómo los agentes de enlazado optimizan la resistencia de la intercara entre las cargas sólidas y la matriz aglomerante, mejorando significativamente la

[1] INTA.
[2] Universidad Rey Juan Carlos.

capacidad del motor para disipar la energía que, de otra forma, afectaría a un crecimiento incontrolado de grietas. El objetivo último del documento es el análisis del comportamiento a fractura en la formulación optimizada, comparándose frente a una referencia comercial y, de esta forma, se pueda asegurar una apropiada integridad estructural, sentando una base científica sólida que permita la producción nacional de estos materiales estratégicos con una integridad estructural suficiente.

Palabras clave: Agente de enlazado, Fractura, HTPB, Propulsante *composite*.

210 – Proyectiles 9 x 19 mm como dispositivos de un solo uso: test de vida acelerado

Autores: Eiras-Barca, Jorge[1]; Carpentier, Alicia V.[2]; Álvarez-Hernández, María[1]; Cores-Carrera, Débora[2]; Borrallo Tirado, Sergio[2]; Mariño-Villar, Rodrigo[3]; Carrasco-Pena, Pedro[2]

Resumen. Dentro del amplio abanico de equipos con los que cuentan las Fuerzas Armadas, existen aquellos mecanismos que podrían englobarse en los llamados dispositivos de un solo uso: productos que permanecen todo su ciclo de vida a la espera, y en el momento en el que se utilizan, se destruyen.

Debido a su propia naturaleza, el control de calidad y la fiabilidad de estos sistemas deben ser exhaustivos dado que no es posible observar su fallo hasta el momento de su utilización.

En este trabajo, se presenta un estudio experimental de un dispositivo de un solo uso ampliamente utilizado en el ámbito de la defensa: la munición de 9 × 19 mm, empleada en armas cortas y subfusiles. Esta investigación es necesaria para contrastar resultados de trabajos puramente teóricos que

[1] Universidad de Vigo.
[2] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
[3] Universidad de Santiago de Compostela.

modelicen el tiempo de vida medio y las probabilidades de fallo de los dispositivos de un solo uso.

El diseño del experimento consistió en el sometimiento de la munición a test de vida acelerados. Previamente, se determinó el umbral de seguridad térmica para evitar la ignición accidental de la munición durante los ensayos. Las variables estudiadas incluyeron temperatura (mediante el uso de una mufla o un congelador), humedad (mediante el uso de una cámara con niebla), inmersión en agua, acidez del medio, salinidad. La combinación de estas variables permitió simular entornos extremos que se mantuvieron durante varios días en cada ensayo.

Tras la exposición se procedió al disparo controlado de la munición con un revólver, registrándose la velocidad de salida del proyectil mediante un cronógrafo y la ocurrencia o no de fallos de fuego (percusión sin ignición). El uso de un revólver es clave para aislar el fallo de fuego en la munición.

Los resultados muestran una elevada estabilidad de la munición en la mayoría de las condiciones estudiadas. Los fallos de disparo se observaron, mayormente, en aquellos test que combinaron inmersión, salinidad, acidez y alta temperatura.

Palabras clave: Dispositivos de un solo uso, Munición 9 x 19 mm, Test de vida acelerado.

240 – Simulación numérica del proceso de fabricación de propulsantes sólidos compuestos

Autores: Rodríguez, Jesús[1]; Chimeno Saavedra, David[2]; López Sánchez, Raúl[2]; Martínez, Mario[1]; Salazar, Alicia[1]; Gómez, Javier[3]

Resumen. Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto PROMANSYS, un contrato financiado por el programa COINCIDENTE, con la participación de la Universidad Rey Juan Carlos, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial y la empresa Advanced Materials Simulation. El objetivo principal del proyecto es generar conocimiento sobre la fabricación de propulsantes sólidos de tipo compuesto y su relación con las propiedades mecánicas, fisicoquímicas, las prestaciones balísticas y la vida en servicio. En este contexto, se estudia la reología de la mezcla energética y su comportamiento viscoelástico mediante simulaciones numéricas del proceso de mezclado y curado de los distintos componentes. La etapa de mezclado constituye la fase más crítica en la producción de propulsantes compuestos de alta energía para aplicaciones en motores cohete, donde el compromiso entre una elevada concentración de sólidos y una adecuada procesabilidad continúa siendo

[1] Universidad Rey Juan Carlos.
[2] INTA.
[3] Advanced Materials Simulation.

un desafío tecnológico relevante. Tras su correspondiente validación con medidas experimentales de reología, se comparan diferentes modelos viscoelásticos. Una vez validado el modelo numérico, este permite abordar la optimización del proceso de fabricación mediante la combinación de componentes, proporciones y variables de proceso. El control de la viscosidad de la mezcla se identifica, por tanto, como un parámetro clave para la obtención de propulsantes sólidos con las prestaciones requeridas.

Palabras clave: Propulsante sólido *composite*, Fabricación, Viscosidad, Reología, Simulación numérica.

100 – *Red phosphorus as additive for rocked propellant*

Autores: Romerosa-Nievas, Antonio Manuel[1]; Scalambra, Franco[1]; Diaz-Ortega, Ismael Francisco[1]

Resumen. White phosphorus (P4) is an energetic compound that is used as a component of some military devices, such as smoke screens and incendiary agents. Despite its advantages in some weapons, it is dangerous to store and manage. Red phosphorus (Pn) is significantly more stable but less reactive; nevertheless, with adequate reactants, it could substitute for P4 in most of its applications. The transformation of P4 into Pn is produced under an inert atmosphere, high pressure and temperature, which is a dangerous and antieconomic procedure. In this communication, a new method for the transformation of P4 into Pn at room temperature by using solar radiation is presented. The obtained Pn is reactive enough to be a valuable component as rocked propellant.

Palabras clave: White phosphorus, Red phosphorus, Rocket propellant.

[1] Universidad de Almería.

1.3
Tecnologías y aplicaciones específicas para armamento

98 – CERAUXET: investigación y desarrollo de estructuras auxéticas de polietileno como backing y soporte de cerámicas de alto rendimiento obtenidas por nuevos procesos

Autor: Gisbert Gomis, José[1]

Resumen. El proyecto CERAUXET ha sido una iniciativa de I+D apoyada y financiada por la SDG PLATIN, que finaliza en mayo de 2026 y que ha tenido como objetivo la obtención de un chaleco de protección balística ICW (In Conjunction With), compuesto por una combinación de panel flexible en conjunción con panel rígido separables, a fin de poder adaptar el nivel de protección al teórico nivel de la amenaza. Este sistema innovador debía cumplir distintos requisitos, tanto de arma blanca y punzón como balísticos frente a distintos niveles de amenaza, debiendo, además, resistir varios impactos, a la vez que reducir el peso de las soluciones actuales, mientras que se mejoraba el comportamiento frente a fragmentos y se reducía el trauma de los impactos.

Asimismo, se debían desarrollar chalecos completos y funcionales, con aproximación de género y un mejor comportamiento ergonómico en uso. En este caso, se han realizado con los prototipos pruebas en vivo en la

[1] AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil.

BRIPAC de Madrid con usuarios reales que permiten asegurar la fiabilidad de los resultados.

Para esto se han abordado distintas tecnologías, tanto para los paneles flexibles como para las placas rígidas. En el primer caso, se han desarrollado soluciones integrando distintos materiales tanto tejidos como monodireccionales que, mediante recubrimientos favorecían la detención de los punzones y municiones y mediante tejidos de género de punto, mejoraban las absorciones de impacto.

En el caso de las placas balísticas rígidas, se ha optado por la combinación de dos materiales fundamentalmente, polietileno de elevado peso molecular, en forma de *backing* que soportaba cerámicas de carburo de boro. Para conseguir el comportamiento multimpacto, la cerámica se ha presentado en forma de teselas hexagonales y para la mejora de los rendimientos, en peso y balísticos, se ha investigado en el desarrollo de *composites* hechos también de este polietileno de alto módulo estructurados de forma tal que presentaran una ratio de *Poisson* negativa, de manera que, en el momento del impacto, se acumulara más material balístico en la zona donde se impactaba.

La cuantificación de los resultados finales de este proyecto, los requerimientos alcanzados, los porcentajes de mejora y las conclusiones extraídas para los nuevos equipos de protección personal balística del futuro son los temas que se abordarán en la comunicación.

Palabras clave: Género de punto, Protección balística, Anticuchillo, *Composites* auxéticos, Cerámicas, Ergonomía.

269 – Sistema C-UAS optrónico-láser de potencia media basado en reutilización de tecnología LWDED y fabricación aditiva: prototipo dual de neutralización graduada de drones clase I

Autores: García Orgeira, Virgilio[1]; Mota, Sergio de la[2]; González, Francisco Javier[1]; Lopera Rodríguez, Manuel[1]; Peralta, Rodolfo Paulo[1]

Resumen. La proliferación de sistemas aéreos no tripulados (UAS) clase I de bajo coste constituye una de las amenazas asimétricas más relevantes para infraestructuras críticas y unidades desplegadas, evidenciada en los conflictos recientes de Ucrania, mar Rojo y Oriente Medio. La respuesta cinética convencional presenta una asimetría económica desfavorable –misiles de decenas de miles de euros frente a drones de centenares– y los sistemas de inhibición RF resultan insuficientes frente a UAS con navegación autónoma o guiado por fibra óptica.

El presente trabajo propone el desarrollo de un prototipo de demostración tecnológica (TRL 4-5) de un sistema C-UAS optrónico-láser de potencia media, concebido como solución dual de coste contenido y bajo consumo energético (concepto SWaP-C alineado con la ETID 2026). El sistema

[1] Novaindef.
[2] Armada española.

integra cuatro subsistemas: (i) cabezal láser de fibra de 150-300 W en longitud de onda 1070 nm, derivado de tecnología LWDED (*Laser Wire Directed Energy Deposition*) ampliamente validada en fabricación aditiva metálica; (ii) suite optrónica de seguimiento con cámara EO de largo alcance, sensor IR no refrigerado y telémetro láser para adquisición y mantenimiento de blanco; (iii) plataforma estabilizada gimbal de dos ejes con componentes estructurales fabricados mediante fabricación aditiva metálica (DED y L-PBF) y polimérica reforzada y (iv) arquitectura de control con algoritmos de fusión sensorial y tracking asistido por IA embarcada.

El concepto operativo no persigue la destrucción cinética del blanco, sino una neutralización graduada y escalable: cegado y degradación de sensores EO/IR del UAS (*soft-kill*), inducción térmica controlada sobre células fotovoltaicas, baterías LiPo y elementos estructurales poliméricos, y ablación selectiva de antenas y superficies aerodinámicas críticas. El presente trabajo valida estos efectos mediante modelado físico-térmico y ensayos estáticos en banco sobre componentes representativos de drones comerciales clase I, estableciendo las relaciones potencia-tiempo-distancia-efecto que servirán de base al posterior demostrador dinámico. La arquitectura es escalable a futuras versiones de mayor potencia (1-10 kW) mediante el mismo bastidor optrónico.

La novedad del proyecto reside en tres aportaciones: la reutilización dual de fuentes láser de fibra industriales (Meltio y equivalentes) certificadas y de cadena de suministro nacional/europea consolidada; la aplicación intensiva de fabricación aditiva avanzada (Meltio, TruPrint, FX10-20, HP MJF, Makino D500) disponible en CEDEAC/CESFARE para producción de bajo coste y baja huella logística, y el diseño orientado a integración con plataformas USV/UGV en desarrollo paralelo. El prototipo, previsto para integración y caracterización experimental en banco durante el verano de 2026, busca validar la viabilidad técnica de un sistema C-UAS español de soberanía tecnológica plena, con una hoja de ruta clara de escalado a versiones de mayor potencia y a demostración dinámica en fases posteriores del programa.

Palabras clave: Sistemas aéreos no tripulados (UAS), Amenazas asimétricas, Infraestructuras críticas, Unidades desplegadas, Conflictos recientes, Ucrania, Mar Rojo, Oriente Medio, Asimetría económica, Sistemas cinéticos, Inhibición RF, Navegación autónoma, Guiado por fibra óptica, Sistema C-UAS, Optrónica, Láser de potencia media, Demostrador tecnológico, TRL 4-5, SWaP-C, ETID 2026, Láser de fibra, 1070 nm, LWDED, Fabricación aditiva metálica, Suite optrónica, Cámara EO, Sensor infrarrojo (IR), Telémetro láser, Adquisición de blancos, Seguimiento de blancos, Plataforma gimbal, Estabilización en dos ejes, Fabricación aditiva DED, L-PBF, Materiales poliméricos reforzados, Arquitectura de control, Fusión sensorial, Tracking asistido por IA, IA embarcada, Neutralización no cinética, Soft-kill, Degradación de sensores, Inducción térmica, Células fotovoltaicas, Baterías LiPo, Ablación selectiva, Superficies aerodinámicas, Modelado físico-térmico, Ensayos en banco, Relación potencia-tiempo-distancia, Demostrador dinámico, Escalabilidad tecnológica, Alta potencia (1–10 kW), Láseres industriales, Cadena de suministro europea, Fabricación aditiva avanzada, Meltio, TruPrint, FX10-20, HP MJF, Makino D500, CEDEAC, CESFARE, Producción de bajo coste, Huella logística reducida, Integración USV, Integración UGV, Soberanía tecnológica, Defensa española, Hoja de ruta tecnológica, Validación experimental.

Área 2
SENSORES Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS

2.1
Tecnologías electrónicas

50 – Evaluación electromagnética de materiales para fabricación aditiva de radomos: transparencia, rugosidad y comportamiento en servicio

Autores: Ruiz Pérula, Rosa[1]; González, Ramón[1]; Peñalba Luna, Carlos[2]; Lopera Rodríguez, Manuel[1]; Lasagni, Fernando[1]

Resumen. La protección de sistemas de comunicaciones y sensores en plataformas militares mediante estructuras tipo radomo constituye un elemento crítico para garantizar la operatividad en entornos adversos, donde factores como la intemperie, la abrasión o la firma electromagnética pueden comprometer el rendimiento. En este trabajo, se presenta un estudio orientado al desarrollo de radomos mediante técnicas de fabricación aditiva (FA), evaluando su comportamiento en un rango de frecuencias comprendido entre 1 GHz y 5,5 GHz, representativo de aplicaciones habituales en comunicaciones y sistemas radar.

El enfoque propuesto analiza la influencia del material y del acabado superficial en la atenuación de señal, considerando la pérdida de potencia recibida (dBm) como parámetro principal de evaluación. Se lleva a cabo una campaña experimental sobre un conjunto de trece materiales distintos

[1] Novaindef (Soluciones Sicnova).
[2] Escuela Politécnica Superior del Ejército.

fabricados mediante FA, permitiendo establecer comparativas directas en términos de transparencia electromagnética y eficiencia de transmisión en diferentes bandas de frecuencia.

Desde el punto de vista técnico, el estudio profundiza en la relación entre las propiedades dieléctricas de los materiales, la rugosidad superficial derivada del proceso de fabricación y su impacto en la dispersión y absorción de la señal. Asimismo, se analizan estrategias de posprocesado orientadas a mejorar el acabado superficial y, por ende, el rendimiento electromagnético del radomo, sin comprometer su integridad estructural.

Adicionalmente, se realiza una evaluación comparativa del comportamiento de los materiales frente a condiciones ambientales, incluyendo exposición a agentes climáticos, con el objetivo de determinar su durabilidad y estabilidad en escenarios operativos reales. Este análisis permite identificar soluciones que combinan un adecuado rendimiento electromagnético con resistencia a la intemperie, aspecto clave para aplicaciones en despliegues prolongados.

Los resultados obtenidos permiten definir criterios de selección de materiales y parámetros de fabricación para optimizar el diseño de radomos mediante FA, contribuyendo a reducir costes y tiempos de producción, así como a mejorar la adaptabilidad a diferentes plataformas y necesidades operativas. Esta aproximación posiciona la fabricación aditiva como una herramienta estratégica para el desarrollo de soluciones avanzadas en el ámbito de las comunicaciones en defensa.

Palabras clave: Radomo, Fabricación aditiva, Pérdidas de señal, dBm, Materiales dieléctricos, Comunicaciones.

61 – Arquitectura cuádruple para receptores ULA en tecnología CMOS 65 nm

Autores: Aznar, Francisco[1]; Esteban Eraso, Uxua[2]; Díez-Senorans, Guillermo[1]; Tardioli, Danilo[1]; Celma, Santiago[2]

Resumen. Esta contribución presenta los avances en la caracterización y optimización de un *array* receptor lineal de 32 elementos bajo una arquitectura cuádruple mediante control de fase. Por lo tanto, la antena matricial está formada por 32 elementos radiantes linealmente equiespaciados (*Uniform Linear Array* – ULA) cada uno de ellos asociado a una cadena electrónica formada por dos celdas constituyentes: un amplificador de bajo ruido y un desplazador de fase controlado digitalmente. Por tanto, la arquitectura cuádruple requiere de ocho ASIC (circuito integrado de aplicación específica), cada uno contiene cuatro amplificadores de bajo ruido y cuatro desplazadores de fase, y está asociado a cuatro elementos radiantes adyacentes. Cada desplazador de fase está controlado mediante 5 bits, que permiten determinar la distribución de fases, modificando el ángulo del lóbulo principal de la antena lineal. El ASIC está diseñado en un proceso CMOS de 65 nm.

El patrón de radiación ideal de la antena de 32 elementos con un espaciado d = 0,55 λ y distribución de fase homogénea presenta un lóbulo principal

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza.
[2] Universidad de Zaragoza.

ortogonal con un ancho a media potencia de 2,9°, lóbulos secundarios a 13,2 dB y nulos casi perfectos. Se han estudiado distribuciones de fase que dirigen el ángulo del lóbulo principal en el rango ±30°. Además, se han simulado las variaciones de fase de ambas celdas constituyentes derivadas de variaciones PVT, es decir, cambios de temperatura (entre -40 y +80 °C), voltaje de alimentación (entre 1 y 1,4 V) y variaciones de proceso (5 corners), las cuales conllevan diferentes penalizaciones en el patrón de radiación de la antena lineal. La arquitectura cuádruple se ha analizado y optimizado para una frecuencia de 24 GHz, compatible con los estándares de comunicación de última generación.

El análisis se ha realizado mediante tres nuevas métricas que cuantifican por separado las tres principales penalizaciones en el patrón de radiación a partir de las variaciones de fase de las celdas (direccionamiento, lóbulos secundarios y nulos), extrayendo más información que el parámetro global habitual: error de fase RMS. Los resultados muestran que las variaciones PVT presentan un considerable impacto en el patrón de radiación bajo la arquitectura cuádruple. Sin embargo, las métricas permiten optimizar los resultados tanto individualmente, como bajo un criterio global distinto del error de fase RMS.

Palabras clave: Antena matricial, Conjunto de antenas en fase, Direccionamiento de haz, Tecnología CMOS.

99 – Estabilidad de las emisiones EMI conducidas en convertidores DC-DC GaN bajo irradiación ionizante: caracterización *in situ*

Autores: Arteche, Fernando[1]; Pradas, Álvaro[1]; Arcusa, Alberto[1]; Rivetta, Claudio[1]; Galindo, Javier[1]; Echeverría, Iván[1]

Resumen. La incorporación de tecnologías de banda ancha (*Wide Bandgap*, WBG), y en particular de dispositivos basados en nitruro de galio (GaN), está transformando la electrónica de potencia en aplicaciones de defensa y espacio al permitir mayores densidades de potencia y operación a elevada frecuencia. En estos entornos, los sistemas electrónicos deben operar bajo condiciones donde la dosis total ionizante (TID) puede situarse típicamente en el rango de 100 krad a 1 Mrad para garantizar la supervivencia operativa, siendo, además, críticos los efectos asociados a eventos singulares (*Single Event Burnout*, SEB). En este contexto, los convertidores DC-DC deben asegurar tanto la resistencia a la degradación acumulativa como la inmunidad frente a dichos fenómenos. La tecnología GaN presenta ventajas significativas, al ofrecer elevada tolerancia a TID y mayor robustez frente a SEB, facilitando el desarrollo de sistemas más compactos, eficientes y con menor necesidad de *derating*.

[1] Instituto Tecnológico de Aragón.

No obstante, su integración en entornos operacionales complejos exige garantizar no solo la robustez eléctrica, sino también la estabilidad del comportamiento electromagnético a nivel de sistema. Los convertidores conmutados constituyen una fuente intrínseca de emisiones electromagnéticas conducidas, cuyo control resulta esencial para asegurar la compatibilidad electromagnética (EMC), evitar interferencias y mantener una firma electromagnética predecible.

En este contexto, resulta clave analizar si los mecanismos de degradación inducidos por TID en dispositivos GaN se traducen en variaciones en el espectro de emisiones EMI. Este trabajo presenta un estudio experimental del comportamiento de las emisiones conducidas en un convertidor DC-DC basado en GaN sometido a irradiación, evaluando su evolución durante el proceso de degradación.

Frente a los enfoques convencionales basados en medidas previas y posteriores a la irradiación, se propone una metodología de caracterización *in situ* que permite la monitorización continua de las emisiones durante el propio proceso de irradiación. Para ello, se ha desarrollado una plataforma de medida portátil capaz de operar en entornos de irradiación, permitiendo la adquisición simultánea del ruido conducido en modo común y diferencial tanto en la entrada como en la salida del convertidor. La validación experimental se ha llevado a cabo mediante irradiación con protones de 25 MeV hasta alcanzar una dosis acumulada de 30 MRad, un nivel muy superior a los escenarios operativos habituales en defensa. El análisis, basado en métricas de picos espectrales y energía integrada, evidencia que el convertidor mantiene una respuesta electromagnética estable a lo largo de todo el proceso. La metodología desarrollada constituye un marco válido para la validación de convertidores en condiciones representativas de operación, siendo, además, extensible a otras tecnologías (Si, SiC) y a la caracterización de fenómenos transitorios asociados a eventos singulares.

Palabras clave: GaN, DC-DC, Radiación ionizante - TID, Compatibilidad Electromagnética - EMC, Medida *in situ*.

2.2
Radar

56 – Caracterización de la sección radar de grandes plataformas con metasuperficies de baja observabilidad mediante modelado a escala

Autores: Guijarro-Maortua, María[1]; Martínez Garces, Iván[1]; Sierra Castañer, Manuel[1]; Fernández González, José Manuel[1]

Resumen. Debido al avance de las tecnologías radar, la necesidad de caracterizar la detectabilidad de las plataformas y reducirla ha cobrado aún mayor importancia. El parámetro que cuantifica esa detectabilidad es la sección radar (RCS), que es la relación entre la potencia que incide sobre un blanco y la que se refleja en una determinada dirección. Depende de diversos factores, tanto del blanco como del sistema radar: el tamaño, la forma y el material del que está compuesto el blanco; la frecuencia, la polarización y el ángulo de incidencia con el que incida la onda sobre él, y la geometría del radar, ya que el ángulo de reflexión de interés es diferente si se trata de un radar monoestático, biestático o multiestático.

Para calcular la RCS de una plataforma se necesitan simuladores electromagnéticos y es muy costoso computacionalmente. Por ello, existen métodos aproximados basados en óptica física y en óptica geométrica

[1] Grupo de Radiación, Information Processing and Telecommunications Center, Universidad Politécnica de Madrid.

que pueden servir como una buena aproximación. De manera complementaria, es necesaria una caracterización en medida, que puede ser en instalaciones anecoicas o abiertas. Sin embargo, cuando se trabaja con blancos muy grandes eléctricamente puede ser muy costoso y en algunos casos imposible. Como método alternativo surge el modelado a escala, que permite trabajar con blancos más pequeños a nivel físico a costa de medir a frecuencias más altas.

Cuando el objetivo es reducir la RCS, existen diversos métodos, pero este trabajo se centra en el uso de metasuperficies dispersivas, que reducen la RCS monoestática -12 dB, lo que implica una reducción en la distancia de detección del 50 %. Estas estructuras están compuestas por elementos conductores dispuestos sobre un material dieléctrico, lo que hace que su modelado a escala no sea directo.

En este trabajo se presenta la medida a escala como una buena solución para caracterizar la RCS de plataformas eléctricamente grandes y su reducción mediante metasuperficies. Partiendo de una metasuperficie capaz de reducir -12 dB la RCS en la banda 9,16 – 11,72 GHz, se ha escalado y optimizado para funcionar en la banda 82,25 – 109,81 GHz. Esto implica un factor de escala N = 10, lo que significa reducir el tamaño físico del blanco una décima parte. Así, los resultados de medida de este blanco y de la metasuperficie escalados son equivalentes a medir el blanco real con la metasuperficie original.

Con esta metodología y resultados de simulación, se han fabricado y medido diversos blancos metálicos, así como la metasuperficie resultante, validando los resultados.

Palabras clave: Sección radar, Reducción de sección radar, Baja observabilidad, Grandes plataformas, Metasuperficies, Modelado a escala.

146 – Optimización de la detectabilidad de mini-UAV en radar pasivo DVB-T mediante *beamforming* MRC e integración coherente extendida de banda ancha

Autores: Suárez Maté, Manuel[1]; Martínez del Pino, Lydia[1]; Nocelo López, Rubén[2]

Resumen. La detección y el seguimiento de vehículos aéreos no tripulados de pequeña escala (minidrones) representa uno de los desafíos más complejos en la seguridad de entornos costeros y militares debido a su reducida sección eficaz de radar (RCS). Los radares pasivos basados en iluminadores de oportunidad (PCL), como las señales de televisión digital (DVB-T), ofrecen una solución discreta y de bajo coste para este propósito. Sin embargo, extraer los ecos extremadamente débiles de estos objetivos requiere exprimir al máximo todas las dimensiones del procesado de señal: la temporal, la frecuencial y la espacial. En este trabajo se propone una arquitectura de procesado avanzada que combina de forma sinérgica tres técnicas de alta resolución y ganancia. En primer lugar, se emplean canales combinados de gran ancho de banda para lograr una resolución en distancia óptima, reduciendo el volumen de la

[1] Spanish Navy, Ministry of Defense, [2]Defense University Center at the Spanish Naval Academy.

celda de resolución y minimizando el ruido integrado en ella. En segundo lugar, se aplican tiempos de integración coherente (CPI) extremadamente largos. Esta integración extendida eleva de forma masiva la ganancia de procesado Doppler, permitiendo discriminar la velocidad radial del dron frente al fuerte *clutter* de la orografía circundante. Para evitar que la dispersión de energía y las interferencias degraden esta sensibilidad, la dimensión espacial se gestiona mediante un *array* lineal uniforme (ULA) operando bajo el criterio de combinación de relación máxima (*Maximal Ratio Combining*, MRC). Al contrario que otros métodos adaptativos que sacrifican directividad para cancelar interferencias mediante nulos espaciales, el MRC suma de forma coherente los recursos de todas las antenas para maximizar la relación señal-ruido (SNR) apuntando rígidamente al blanco. Previamente, la fuerte interferencia de trayecto directo (DPI) del transmisor se elimina en el dominio temporal mediante el algoritmo de cancelación extensiva (ECA). La convergencia de estas tres técnicas permite alcanzar un umbral de SNR y una probabilidad de detección significativa para detectar minidrones de baja RCS. Este enfoque integral demuestra que la explotación simultánea de la resolución en distancia, la ganancia Doppler por CPI largo y la directividad espacial del MRC constituye una estrategia robusta para la protección del espacio aéreo frente a amenazas asimétricas a gran distancia.

Palabras clave: *Beamforming*, Iluminador de oportunidad, Radar pasivo, RCS, UAV.

2.3
Sensores y sistemas optrónicos

127 – Desarrollo de un sensor de imagen LiDAR 3D de largo alcance para la detección y seguimiento de amenazas aéreas de baja observabilidad

Autores: Giménez-Aragón, Sara[1]; García-Gómez, Pablo[2]; Bernal, Eduardo[1]; Ballesta-García, María[1]; Riu Gras, Jordi[2]; Royo, Santiago[1]

Resumen. La proliferación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en contextos tanto civiles como militares representa una amenaza creciente para el espacio aéreo protegido, las infraestructuras críticas y las zonas de operaciones sensibles. La detección y el seguimiento de estos objetivos de pequeña sección transversal, que a menudo operan a baja altura, gran velocidad y con trayectorias impredecibles, constituye un desafío tecnológico de primer orden. Esto es especialmente crítico en entornos complejos como zonas urbanas o bajo condiciones de visibilidad degradada, donde las tecnologías de detección tradicionales (radar, acústica o radiofrecuencia) presentan limitaciones ante objetos con baja sección eficaz de radar (RCS) o firmas pasivas a largas distancias.

[1] Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentos y Sistemas (CD6), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
[2] Beamagine S. L.

Para abordar estas carencias, este trabajo presenta el desarrollo de un concepto innovador de sensor de imagen LiDAR 3D diseñado específicamente para misiones de detección, reconocimiento, identificación y seguimiento (DRIT) de blancos aéreos de pequeño tamaño en aplicaciones de defensa. Esta solución, orientada al *hardware*, se complementa con un marco de simulación propio que permite optimizar los compromisos críticos del sistema en cuanto a geometría de escaneo, presupuesto energético y probabilidad de detección.

El sistema propuesto emplea una arquitectura LiDAR 3D patentada, optimizada para la detección a largo alcance (hasta varios kilómetros) y proporciona un campo de visión horizontal (HFOV) de 360º. Está diseñado para localizar drones de baja observabilidad con perfiles de vuelo ágiles, permitiendo el seguimiento simultáneo de múltiples objetivos. La tecnología se basa en un haz láser pulsado altamente direccionable mediante tecnología MEMS (sistemas microelectromecánicos), lo que permite una conmutación automática y fluida entre los modos de detección y seguimiento. Asimismo, el sistema es agnóstico a la longitud de onda, facilitando su futura implementación en las bandas MWIR o LWIR.

Una parte fundamental del diseño ha sido el uso de una herramienta de simulación en MATLAB que combina aspectos geométricos y radiométricos, permitiendo analizar la probabilidad de detección bajo diversas condiciones de ruido y falsas alarmas. Las pruebas preliminares de campo han validado las predicciones del modelo y confirmado la viabilidad del concepto. Este sensor es integrable en plataformas móviles terrestres o aéreas, pudiendo operar de forma autónoma o integrado en sistemas multisensor. En la comunicación se describirá el estado actual del desarrollo, los resultados experimentales preliminares y las principales restricciones de diseño consideradas para su futura operatividad en escenarios reales y operaciones antidron.

Palabras clave: LiDAR, UAV, Anti-UAV, DRIT, Sensores optrónicos.

187 – Emisiones de radiación infrarroja de un motor de avión de combate: SAF frente a combustible convencional

Autores: Suárez Millán, Rubén[1]; García López, Belén[1]; Márquez González, María[1]

Resumen. El combustible sostenible de aviación (SAF) ofrece beneficios ambientales, estratégicos y operativos a las fuerzas armadas modernas, entre ellos la reducción de las emisiones de carbono a lo largo del ciclo de vida, una mayor resiliencia energética y una mejor interoperabilidad logística con naciones aliadas. Sin embargo, la adopción del SAF introduce una consecuencia operativamente relevante, aunque todavía poco explorada. Las diferentes propiedades del SAF modifican la composición termoquímica de la pluma de escape del motor y, en consecuencia, la firma infrarroja (IR) de la aeronave, un aspecto crítico para la detección y la supervivencia frente a amenazas antiaéreas guiadas por infrarrojos.

Este estudio, realizado en colaboración con el Ejército del Aire, mide la influencia del SAF en las emisiones infrarrojas de la pluma de aviones de combate, analiza las emisiones de radiación de cada especie (CO_2, H_2O, CO-NO_2, hollín, hidrocarburos inquemados) e investiga los mecanismos que explican sus variaciones. Se ha utilizado tecnología de imagen

[1] ITP Aero.

multiespectral para medir la firma infrarroja del Eurofighter utilizando combustible convencional JP8 y un porcentaje de mezcla de significativo de SAF y JP8. El empleo de filtros de banda ancha y filtros espectrales permiten determinar y comparar la radiación emitida por las diferentes especies de los gases de escape. Los ensayos se realizaron en el punto fijo de la Base Aérea de Torrejón de Ardoz para varios niveles de potencia.

Las mediciones se complementan con simulaciones radiativas para evaluar la atenuación atmosférica y estimar tanto las temperaturas de la pluma como los cambios en la generación de partículas de hollín. Estos modelos también se aplicarán para cuantificar el impacto en firma infrarroja en escenarios más allá de la configuración del ensayo.

Resultados preliminares indican que el uso de la mezcla SAF resulta en una reducción medible en las emisiones infrarrojas globales frente a JP8 en condiciones sin poscombustión. Se observa una reducción clara de las emisiones correspondientes a las bandas espectrales del hollín, los hidrocarburos inquemados, y el CO-NO_2, así como variaciones en las emisiones del CO_2 y el H_2O debidas a la distinta relación hidrógeno-carbono de los combustibles.

Palabras clave: Radiación, SAF, Firma infrarroja, Multiespectral, Hollín, Pluma.

2.5
Tecnologías PNT y sensores emergentes

241 – Evaluación del posicionamiento con señales de satélites de oportunidad (SATSOO) en el entorno naval

Autores: Núñez Ortuño, José María[1]; Paniagua Vilar, Enrique[1]; Gómez-López, Miguel[2]

Resumen. En este trabajo, se plantea una solución de contingencia para la navegación naval frente a la vulnerabilidad de los sistemas de posicionamiento global tradicionales. En escenarios marítimos donde las señales electromagnéticas son alteradas con frecuencia, bloqueadas o suplantadas deliberadamente para desorientar a las tripulaciones, contar con una alternativa robusta resulta vital. Al funcionar de forma enteramente pasiva, el receptor diseñado no emite radiación para obtener sus coordenadas, garantizando la discreción electromagnética del buque y reduciendo de forma drástica su huella frente a sensores hostiles.

Para resolver este desafío, se descartan las técnicas convencionales basadas en el tiempo de llegada y se propone un avanzado enfoque geométrico puramente angular. Este sistema saca partido de las emisiones electromagnéticas existentes de constelaciones comerciales de órbita baja (LEO), como Starlink o Iridium, así como de satélites en órbitas medias

[1] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
[2] Universidad Carlos III de Madrid.

(MEO) y geoestacionarias (GEO), empleándolos todos como satélites de oportunidad. Sin requerir infraestructura espacial propia, se logra inferir la posición de la embarcación analizando exclusivamente el azimut y la elevación de las señales captadas en el entorno.

El desarrollo de esta arquitectura se fundamenta en un modelo matemático implementado mediante un simulador propio en MATLAB. Su núcleo computacional recae en un algoritmo de optimización no lineal basado en mínimos cuadrados ponderados dependientes de la elevación. Este algoritmo procesa un vector de estado de cuatro grados de libertad, permitiendo estimar la latitud y longitud con precisión y autocalibrando dinámicamente los sesgos instrumentales de la antena, lo que mitiga las divergencias indeseadas durante la navegación prolongada.

La solidez computacional se evaluó primero a través de un diseño experimental de cuatro fases que sometió al sistema a condiciones críticas de ruido y aislamientos geográficos extremos. Por último, la viabilidad de la propuesta se consolidó comprobando la solución experimentalmente con la constelación GPS. Para ello, se hizo uso de un *array* circular de antenas con el que se obtuvo el azimut y la elevación de cada satélite visible mediante avanzadas técnicas de *beamforming*. Este contraste empírico demostró que el algoritmo evita el colapso matemático, confirmando que la arquitectura analítica constituye una herramienta tecnológica plenamente operativa y altamente fiable.

Palabras clave: Satélites de oportunidad (SATSOO), Posicionamiento pasivo, Navegación resiliente, *Beamforming*, Geometría angular (*Bearing-Only*).

62 – ISNAV: sistema de navegación vehicular con capacidades *antispoofing* GNSS

Autores: Vallejo Antolín, Antonio[1]; Pichel Mira, Manuel[1]; Nieto Chamorro, Francisco José[1]

Resumen. GMV comenzó a desarrollar en 2018 un nuevo sistema de navegación vehicular (ISNAV) con el objetivo de dotar de capacidades de navegación resiliente en escenarios de guerra electrónica a cualquier tipo de vehículo de las Fuerzas Armadas (FAS). En la actualidad, destaca su uso en plataformas ya existentes, como el VCR 8x8 y las piezas de artillería M109 y SIAC, y se está trabajando en su integración en plataformas asociadas a los nuevos programas especiales de modernización (PEM). Desde su inicio, la familia de productos ISNAV ha tenido una evolución constante con el fin de añadir mejoras en cuanto a precisión y resiliencia. Una de las principales capacidades añadidas es la introducción de algoritmos de detección y mitigación de ataques de *spoofing* sobre la señal GNSS, permitiendo la detección temprana de estas perturbaciones y la continuación segura de operaciones. En nuevas variantes especializadas para entornos críticos, este sistema incorpora receptores GNSS militares (Galileo PRS y GPS M-Code) para reducir la vulnerabilidad frente a interferencias.

[1] GMV Aerospace and Defence.

Un ataque de *spoofing* se define como la suplantación intencionada de señales GNSS, mediante la emisión de señales falsas, con la misma estructura y forma que las señales verdaderas, para confundir a los receptores, deteriorando la calidad y comprometiendo la integridad de la solución de posicionamiento, navegación y tiempo (PNT).

Las principales innovaciones que se encuentran en los algoritmos de ISNAV son:

– Algoritmos de detección de *spoofing* a diferentes niveles para asegurar una detección rápida y fiable, incluyendo una capa inicial de procesamiento de señal, una capa intermedia de procesamiento de medidas y una capa final de monitorización de solución PNT.
– Sistema experto de mitigación y recuperación, encargado de recopilar la información reportada por todos los algoritmos de detección para determinar la probabilidad de que exista un ataque de *spoofing*, identificando las señales y constelaciones afectadas y realizando la mitigación correspondiente de forma automática.

Estos algoritmos han sido probados y validados sobre señales GNSS civiles en las instalaciones del INTA y en el evento JammerTest 2025, en el ámbito del proyecto internacional RIPTIDE de la EDA, sometiendo a ISNAV a diversas perturbaciones y validando su capacidad de detección y mitigación de *spoofing* GNSS, reforzando su resiliencia como navegador en cualquier escenario de operación terrestre. Nuevas campañas de prueba sobre señales GNSS civiles y militares se plantean para 2027.

Palabras clave: PNT, Resiliencia, GNSS, PRS, M-Code, *Spoofing*, Detección, Mitigación.

71 – Proyecto ENASUS: generación de atmósferas contaminadas para la caracterización de sensores MO

Autores: López Sánchez, Raúl[1]; Baza Herrero, David[1]; Díez Castellanos, Roberto[2]; Vega Alegre, Marisol[3]; Debán Miguel, Luis[3]

Resumen. El control preciso sobre la concentración de un analito en fase vapor es esencial para calibrar la respuesta de los sensores de gases. En el presente trabajo, se estudia la calibración del caudal de una nariz electrónica (*enose*) y, además, dos métodos para la generación de contaminantes en fase vapor. El objeto principal del documento es la caracterización de una *enose* basada en un *array* de tres sensores de óxido metálico, MO. Desde un punto de vista matemático, la respuesta del sensor se puede considerar como una función de salida que depende tanto de la función de entrada (f.e.), como de la función de transferencia (f.t.), siendo esta última la que, de conocerse, permitiría el análisis posterior de la respuesta de una *enose* independiente de las fluctuaciones en la f.e., tanto por cambios de concentración como de caudal. El estudio presentado sobre la generación de contaminantes analiza, primero la respuesta de los MO a las f.e. de tipo escalón con caudalímetros de flujo másico (MFC). En segundo

[1] INTA.
[2] Policía Nacional.
[3] Universidad de Valladolid.

lugar, con un acoplamiento novedoso entre un equipo de desorción térmica (ATD) y un cromatógrafo de gases con detector de conductividad térmica (CG-TCD) proporciona f.e. similares a deltas de Dirac. Con esta generación de contaminantes, se analiza la respuesta a vapores orgánicos (p. ej., etanol, acetona y hexano) y, al final del manuscrito, se discute la reproducibilidad alcanzada y, además, se presenta una caracterización de los sensores que permitirían identificar tanto explosivos como drogas, entre otros analitos de interés dentro del campo de la defensa y seguridad.

Palabras clave: ATD, Delta de Dirac, Función de trasferencia, MO, Narices electrónicas.

73 – Proyecto ENASUS: combustión catalítica en sensores MO

Autores: López Sánchez, Raúl[1]; Baza Herrero, David[1]; Díez Castellanos, Roberto[2]; Vega Alegre, Marisol[3]; Debán Miguel, Luis[3]

Resumen. Los sensores quimiorresistivos más utilizados actualmente son los semiconductores de óxido metálico, MO, en particular aquellos basados en óxido de estaño, SnO_2, por su elevada sensibilidad. Sus mecanismos de respuesta suelen justificarse sobre la base de reacciones superficiales de tipo redox donde su dopaje superficial suele realizarse con nanopartículas de metales nobles y elementos de transición para mejorar la selectividad de los sensores mediante procesos catalíticos y el incremento de los sitios activos en la superficie del sensor. A lo largo del presente documento, se ofrecen las primeras pruebas experimentales sobre un nuevo mecanismo de respuesta, la combustión catalítica, complementario a los mecanismos habitualmente documentados en la bibliografía. Para ello, se ha utilizado una metodología que combina los cambios de la resistividad en el semiconductor con la monitorización térmica superficial, mediante una cámara térmica multiespectral (rango de 200 a 500 °C). El manuscrito ha analizado varios sensores de Sn_2, con diferentes dopajes superficiales, expuestos a pulsos controlados de NO_2 en atmósferas controladas

[1] INTA.
[2] Policía Nacional.
[3] Universidad de Valladolid.

(*i.e.*, N_2 con mezclas crecientes de O_2). Los resultados presentados no solo abren la puerta al desarrollo de modelizaciones más precisas de la señal de los MO, sino que también contribuyen a una mejor comprensión de los procesos de respuesta subyacentes, utilizables para el desarrollo de algoritmos de análisis de la señal más eficientes.

Palabras clave: Combustión catalítica, Mecanismos de reacción, MO, SnO_2.

2.6
Computación, fusión y procesamiento de datos de sensores

10 – Transitabilidad desde imágenes RGB de drones. Predicción de la profundidad y los obstáculos por modelos multimodales

Autores: Ortego Navacerrada, César[1]; Bermejo Higuera, Javier[1]; Barea del Cerro, Rafael[2]

Resumen. Determinar si un vehículo puede atravesar un terreno desconocido es un problema crítico en operaciones militares, rescate en catástrofes y exploración interplanetaria. Las soluciones actuales dependen del LiDAR, que delata la posición en combate, o de cámaras estereoscópicas, lentas y sensibles a las condiciones del entorno. Este artículo presenta un método que resuelve el problema usando únicamente imágenes ópticas aéreas tomadas por drones, eliminando la dependencia de sensores costosos o detectables.

El sistema calcula la transitabilidad de carros de combate y vehículos terrestres en entornos no estructurados mediante tres módulos independientes. El primero predice la geometría del terreno con una red neuronal y extrae propiedades como pendiente, rugosidad y curvatura. El segundo clasifica la composición del suelo mediante supersegmentación semántica, capturando materiales mixtos como barro o gravilla que los enfoques

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).
[2] Universidad Nebrija.

clásicos ignoran. El tercero detecta obstáculos combinando un modelo de segmentación genérica con un *embedding* multimodal, permitiendo identificar cualquier objeto intransitable sin necesidad de reentrenamiento. La probabilidad final de paso se obtiene combinando los tres módulos de forma estadísticamente independiente, lo que garantiza, además, la explicabilidad del resultado. Con esta información, se calcula la ruta más segura y rápida mediante A* ponderado, y se ofrece la probabilidad de paso real.

El método se evalúa sobre ortofotos reales del complejo La Marañosa a 2 m/píxel, obteniendo una mejora sustancial frente a los métodos del estado del arte. A diferencia de los enfoques previos, el modelo divide explícitamente los cálculos geométricos y semánticos, lo que permite identificar qué factor limita el paso en cada zona. Las rutas calculadas se validan, además, en entornos simulados con Arma 3, donde el vehículo alcanza el destino siguiendo el camino más seguro predicho. La arquitectura en pirámide de imágenes garantiza su escalabilidad a distintas resoluciones y escenarios.

Este trabajo supone un avance significativo hacia la navegación autónoma en entornos no estructurados. Al sustituir sensores físicos por visión aérea, abre la puerta a vehículos más ligeros, menos detectables y capaces de operar en territorios completamente desconocidos, desde zonas de conflicto hasta la superficie de Marte.

Palabras clave: Transitabilidad, UAV, SAM, Simulación.

4 – Clasificación de combustibles forestales mediante teledetección y aprendizaje automático en áreas militares mediterráneas

Autores: Lamelas Gracia, María Teresa[1]; Montealegre Gracia, Antonio Luis[2]; Romero Medina, Santiago Patricio[1]; Hoffrén Mansoa, Raúl[3]; Domingo Ruiz, Darío[4]; García Martín, Alberto[2]; Riva Fernández, Juan Ramón de la[1]

Resumen. El conocimiento detallado de los combustibles forestales es clave para la prevención, planificación y respuesta ante incendios, sobre todo en regiones mediterráneas donde las condiciones climáticas y la estructura de la vegetación favorecen su propagación. Este aspecto resulta especialmente relevante en terrenos gestionados por el Ministerio de Defensa, donde actividades como maniobras militares o el uso de munición real incrementan el riesgo de ignición. En particular, áreas como el Centro de Adiestramiento (CENAD) San Gregorio (Zaragoza) constituyen entornos críticos donde la caracterización de la vegetación es esencial para garantizar la seguridad de las operaciones del Ejército de Tierra. En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de distintas fuentes de teledetección para la estimación y clasificación

[1] Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
[2] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.
[3] Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
[4] Departamento de Geografía, Universidad de Valladolid.

de combustibles forestales en la depresión del Ebro, una zona con elevada heterogeneidad ambiental y recurrencia de incendios. La investigación se basa en el uso combinado de datos LiDAR de la tercera cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y datos multiespectrales de imágenes Sentinel-2. La verdad terreno está compuesta por un conjunto de parcelas previamente inventariadas en campo, donde se ha identificado el tipo de combustible según la clasificación Prometheus. Desde el punto de vista metodológico, las nubes de puntos LiDAR fueron sometidas a un proceso de filtrado, normalización y generación de modelos digitales del terreno, lo que permitió la extracción de métricas estructurales de la vegetación (altura, densidad y diversidad). Estas variables se emplearon como entrada en modelos de aprendizaje automático, concretamente Random Forest y Support Vector Machine, para la clasificación de combustibles forestales. Paralelamente, se realizó una clasificación digital supervisada de una imagen Sentinel-2, orientada a la identificación de tres clases de cobertura fundamentales: suelo desnudo, pastizal y vegetación arbustiva y arbórea. Esta clasificación permitió complementar la información estructural proporcionada por el LiDAR, mejorando la discriminación de tipos de combustible. Los resultados preliminares muestran que los datos LiDAR de la tercera cobertura del PNOA, que tienen una densidad de 5 puntos/m^2 frente a los 0,5-2 puntos/m^2 de las dos coberturas anteriores, incrementan la exactitud de la clasificación, alcanzando valores cercanos al 80 %. En conclusión, la combinación de datos LiDAR, Sentinel-2 y técnicas de aprendizaje automático puede constituir una herramienta eficaz para la cartografía de combustibles forestales, de gran utilidad para el Ejército de Tierra en la planificación de maniobras seguras, así como para la Unidad Militar de Emergencias en la gestión de incendios forestales.

Palabras clave: Gestión de incendios, LiDAR, Sentinel-2, Análisis geoespacial, Cartografía de combustibles.

89 – Seguimiento de objetivos y evaluación de amenazas con compensación de ego-movimiento para vigilancia aérea con UAV

Autores: Manibardo, Eric L.[1]; Alonso-Montes, Carmen[1]

Resumen. El uso de inteligencia artificial en sistemas de conciencia situacional (*situational awareness*) permite automatizar el procesamiento de grandes volúmenes de información del campo de batalla y transformarla en conocimiento accionable para la toma de decisiones en entornos de defensa. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) constituyen una plataforma clave para la adquisición de información visual en tiempo real durante misiones de vigilancia.

En este trabajo, se presenta un sistema embarcable en UAV para la identificación, seguimiento y clasificación de objetivos, orientado a la detección de amenazas mediante el análisis de trayectorias relativas. La principal contribución es el diseño de una solución integrada que combina detección, seguimiento y compensación de ego-movimiento para permitir una clasificación robusta en escenarios reales. La solución identifica objetos en hasta siete categorías y evalúa su nivel de riesgo según su movimiento

[1] TECNALIA Research & Innovation.

respecto a la trayectoria del UAV, operando en entornos complejos con alta densidad de objetivos, oclusiones y movimiento no lineal, y considerando el movimiento propio del UAV y la cámara.

La arquitectura combina el detector YOLOX, seleccionado por su compromiso entre precisión y eficiencia, con el algoritmo de seguimiento OC-SORT, robusto frente a oclusiones y variaciones de movimiento. Para desacoplar el movimiento del UAV y la cámara de los objetivos, se estima el flujo óptico mediante Lucas-Kanade piramidal junto con una transformación afín parcial por RANSAC. La mediana de los desplazamientos *inliers* se emplea como estimación del ego-movimiento, que se sustrae de las trayectorias observadas.

Las trayectorias corregidas alimentan una máquina de estados de tres niveles (seguro, riesgo, amenaza), donde la clasificación se basa en el desplazamiento acumulado y las transiciones de estado en umbrales adaptativos dependientes de la resolución, incorporando mecanismos de robustez ante movimientos bruscos. La evaluación sobre VisDrone, mediante HOTA para el seguimiento y precisión y *recall* para la clasificación de amenazas, evidencia la viabilidad del sistema en condiciones reales.

Palabras clave: Conciencia situacional, Detección de amenazas, Seguimiento, UAV.

136 – Detección de humanos y objetos para la cubierta forestas con LiDAR y redes neuronales profundas

Autor: Gutiérrez Lancho, Christian[1]

Resumen. La detección de objetos artificiales ocultos bajo el dosel forestal constituye uno de los desafíos más persistentes en vigilancia de fronteras y en la capacidad de los cuerpos de seguridad para conocer lo que ocurre en su área de responsabilidad. Los bosques proporcionan una cobertura natural que limita o imposibilita el uso de tecnologías convencionales: las imágenes térmicas solo detectan fuentes de calor activas, los radares de apertura sintética presentan restricciones de resolución y dimensiones para su integración en plataformas UAV, y los sistemas de detección por vibración del follaje son efectivos únicamente ante vehículos en movimiento.

En este contexto, el proyecto CANOPER-1 propone una solución basada en la combinación de tecnología LiDAR aerotransportada en UAV e inteligencia artificial aplicada a la segmentación de nubes de puntos. LiDAR es un sensor activo que emite pulsos láser y mide la distancia de rebote, generando representaciones tridimensionales de alta densidad. Su capacidad de penetración parcial del dosel forestal –donde una fracción de los

[1] Tracasa Instrumental.

pulsos atraviesa la vegetación y alcanza el suelo subyacente– lo convierte en la tecnología idónea para este caso de uso. Su integración en UAV añade versatilidad operacional y potencial de despliegue encubierto.

El objetivo científico central consiste en demostrar que los modelos de aprendizaje profundo, entrenados sobre nubes de puntos LiDAR, son capaces de identificar automáticamente personas, tiendas de campaña y vehículos ocultos bajo el dosel forestal. Para mitigar la escasez de datos etiquetados en este dominio, se ha desarrollado un flujo de trabajo para la generación de datos sintéticos. Este procedimiento construye escenas tridimensionales realistas mediante la inserción de objetos de interés en modelos de terreno boscoso real, emulando condiciones similares a las esperadas en escenarios operacionales. Posteriormente, a través del simulador de código abierto Helios++, simula el vuelo del UAV sobre dichas escenas, para obtener las nubes de puntos resultantes. Este enfoque permite expandir y diversificar el conjunto de entrenamiento de forma controlada y eficiente, reduciendo la dependencia de costosas campañas de adquisición de datos en campo.

CANOPER-1, financiado por el programa de investigación de FRONTEX, progresa desde un nivel de madurez tecnológica TRL3 a TRL6. El proyecto sienta las bases de un futuro sistema operativo de vigilancia fronteriza capaz de detectar asentamientos y actividades ilícitas ocultas bajo la vegetación.

Palabras clave: LiDAR, *Deep learning*, Object detection, *Situation awareness*, *Forest canopy*.

165 – Detección de anomalías en datos AIS mediante aprendizaje no supervisado para apoyo a la vigilancia marítima: revisión del estado del arte y propuesta metodológica para operaciones de seguridad en aguas españolas

Autores: Chaparro Parra, Víctor[1]; Naranjo Martínez, Manuel[1]; Ciruelo Sanz, Luis[1]; Pita López, Juan[1]; Cruz Ortega, Raúl[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) establece en su Línea 2.6.3 la necesidad del análisis automático e inteligente de grandes volúmenes de datos de sensores y en la Línea 11.1.3 la explotación inteligente de múltiples fuentes heterogéneas para la generación de inteligencia. En el dominio marítimo, el Sistema de Identificación Automática (AIS) constituye la fuente primaria de conciencia situacional, con más de 1,4 millones de buques rastreados globalmente y más de quinientos millones de mensajes diarios.

Sin embargo, la fiabilidad del AIS se ve comprometida por vulnerabilidades deliberadamente explotadas por actores involucrados en narcotráfico

[1] HI-Iberia Ingeniería y Proyectos.

marítimo e inmigración irregular: apagados intencionados del transpondedor, suplantación de identidad (*spoofing*), transmisión de posiciones falsas, merodeos y cambios bruscos de velocidad. El volumen de datos supera la capacidad de análisis humano de los controladores de tráfico marítimo, requiriendo soluciones automatizadas de detección de anomalías.

La contribución principal de este trabajo es la integración de la detección de anomalías AIS como *trigger* de capacidades ISR ya operativas en las FAS, cerrando un ciclo detección-confirmación que los sistemas comerciales de vigilancia marítima (*Windward*, *Global Fishing Watch*) no ofrecen: cuando el módulo AIS identifica un comportamiento anómalo, la plataforma SEDA –desplegada en el CIFAS y el COVAM– lanza de forma automática un *tasking* satelital para obtener confirmación visual, aplicando modelos de detección de embarcaciones ya validados operativamente (precisión 89 %, *recall* 81 %, mAP50 86 % en imágenes VHR ópticas).

Enmarcado en el proyecto PLUTARCO Precursor, cofinanciado por fondos europeos para la Policía Nacional, el trabajo parte de una revisión sistemática de más de 44 publicaciones (Wolsing *et al*., 2022) que abarca *clustering* espaciotemporal (DBSCAN, DTW), *autoencoders*, redes LSTM/BiLSTM y *Transformers* (TrAISformer). Sobre esta base, se propone una metodología adaptada al contexto operativo español –estrecho de Gibraltar, mar de Alborán y archipiélago canario–, con una taxonomía de seis categorías de anomalías relevantes para las FCSE: desviación de ruta, actividad AIS inesperada, llegada inesperada a puerto, aproximación indicativa de transbordo, entrada en zonas restringidas y *spoofing* de posición.

La validación experimental emplea *datasets* de tráfico marítimo real de las zonas de interés operativo, midiendo AUC-ROC, precisión y *recall* frente a *baselines* de *clustering* convencional. Esta fusión AIS-imagen satelital, alineada con las Líneas 2.6.3 y 11.1.3 de la ETID, transfiere capacidad de defensa a seguridad interior, materializando el uso dual previsto en la Estrategia.

Palabras clave: Anomalías AIS, Vigilancia marítima, Policía Nacional, Fusión sensorial, Aprendizaje no supervisado, Narcotráfico.

205 – Reconocimiento de armas de fuego por su firma de audio vía la adaptación y ajuste de modelos fundacionales de audio con escasos datos

Autores: Martín Pérez, Lucía Cristina[1]; Del-Blanco Adán, Carlos Roberto[2]; Alierta Nicodemus, Jesús Ángel[3]

Resumen. La caracterización acústica de disparos constituye una línea de investigación de creciente interés debido a su aplicación en seguridad, ámbito forense y entornos militares. No obstante, el rendimiento de los sistemas automáticos para la detección y reconocimiento de disparos sigue condicionado por la escasez de datos amplios, diversos y etiquetados de forma correcta, capaces de representar la variabilidad real del fenómeno balístico. Esta restricción resulta especialmente crítica cuando se pretende discriminar entre diferentes tipos de armas, modos de disparo y condiciones de captura.

[1] ISDEFE.
[2] Grupo de Tratamiento de Imágenes, Information Processing & Telecommunications Center, Universidad Politécnica de Madrid.
[3] Dirección de Ingeniería del Mando de Apoyo Logístico, Ejército de Tierra, Ministerio de Defensa.

En este contexto, los modelos fundacionales de audio constituyen una alternativa prometedora, al permitir reutilizar el conocimiento adquirido de grandes volúmenes de datos para abordar tareas con pocas muestras anotadas. Sin embargo, muchos modelos fundacionales, como Whisper, han sido entrenados principalmente para el reconocimiento de voz, lo que plantea un reto importante de adaptación al dominio objetivo: el reconocimiento de disparos, cuyas características temporales, espectrales y semánticas difieren de forma notable del habla. Esta diferencia requiere adaptar el modelo al nuevo dominio mediante *fine-tuning*, pero a cosas de perder parte del conocimiento previo, fenómeno denominado olvido catastrófico.

Para mitigar este problema, se propone adoptar la estrategia presentada en WhisPAr que entrelaza módulos de Whisper congelados con módulos Prompt y *Adapter*. Estos permiten orientar el modelo hacia nuevas tareas sin necesidad de reentrenarlo completamente: los Prompt añaden vectores de entrada aprendibles que adaptan globalmente el comportamiento de Whisper, mientras que los Adapter son bloques entrenables locales que adaptan al nuevo dominio las salidas de los módulos de Whisper. Ambos mecanismos facilitan la transferencia de conocimiento desde el reconocimiento del habla hacia el de disparos sin perder en gran medida la capacidad general del modelo.

Como resultado, el enfoque propuesto permite capturar diferencias acústicas sutiles entre firmas balísticas, al combinar la capacidad contextual de Whisper con mecanismos de ajuste fino adaptados al domino de disparos, mitigando el sesgo estructural existente entre el preentrenamiento generalista y la tarea específica de caracterización de disparos. Finalmente, el sistema propuesto se ha validado utilizando un conjunto de datos de firmas balísticas de audio compuesto por archivos de audio públicos de distintas armas. Y se ha completado con una evaluación con grabaciones reales de disparos adquiridas con armas del Ejército de Tierra.

Palabras clave: Disparos, Modelos fundacionales, Clasificación, Sonido.

218 – Aplicación y uso de la tecnología de sensado acústico distribuido con pulsos chirpados para monitorizar infraestructuras críticas submarinas

Autores: García, Aitor[1]; López, Francisco Manuel[1]

Resumen. La protección de infraestructuras submarinas críticas, incluidos los cables de telecomunicaciones y energéticos, es de suma relevancia estratégica, debido a su consideración de infraestructuras críticas de ámbito nacional. El interrogador HDAS de tercera generación (*High-Fidelity Distributed Acoustic Sensor*) de Aragon Photonics Labs ha estado ofreciendo un innovador enfoque para monitorizar estos activos mediante el uso de la tecnología de pulsos chirpados, CP-DAS.

En términos de especificaciones, y solo a través de innovación de *hardware*, se mejora en gran medida la relación señal-ruido durante todo el rango de medición hasta más de 100 km de distancia. Esta capacidad permite una vigilancia continua en tiempo real de la infraestructura submarina, facilitando la detección temprana de amenazas potenciales como actividad no autorizada de embarcaciones, manipulación de cables o peligros ambientales como tsunamis. Al combinar la adquisición de señales

[1] Aragon Photonics Labs.

HDAS con algoritmos de localización precisos, una solución DAS completa puede facilitar el seguimiento y clasificación de objetos dinámicos a lo largo del cable de fibra óptica monitorizado. Su diseño único de pulsos chirpados mejora la sensibilidad a señales de baja amplitud, por debajo de 1 Hz, permitiendo la identificación de firmas acústicas de amenazas sutiles que los sistemas DAS convencionales pueden pasar por alto. Un solo sistema HDAS, instalado en un entorno operativo de cable de telecomunicaciones (ALME, España), ha sido capaz de detectar tanto terremotos de magnitud 1.6 Mw, como ballenas o barcos, e incluso ha detectado la formación de un «free-span», un evento que incrementa aceleradamente el desgaste del cable submarino debido a un movimiento de pandeo y roce con el suelo marino.

En el contexto de defensa, la tecnología CP-DAS proporciona una solución de doble uso capaz de asegurar tanto redes submarinas civiles como militares. Las capacidades de alerta temprana de la tecnología, junto con el seguimiento e identificación en tiempo real, permiten una mitigación proactiva de amenazas, reforzando la resiliencia de las infraestructuras submarinas estratégicas. El objetivo de esta presentación es mostrar los variados resultados obtenidos en el mundo civil relacionados con la monitorización y protección de infraestructuras críticas submarinos y cómo esta tecnología podría adaptarse a operaciones críticas de seguridad submarina, destacando sus ventajas operativas, rendimiento técnico y relevancia estratégica para iniciativas de monitorización y protección alineadas con los objetivos de España y la OTAN.

Palabras clave: Infraestructuras críticas submarinas, Sensado acústico distribuido, Cables de telecomunicaciones, DAS, Fondo marino.

2.8
Guerra electrónica

7 – *Spoofing* de señales AIS desde submarinos y sistemas no tripulados: una capacidad emergente de decepción operativa

Autores: Hoyos Perales, Guillermo[1]; Molina García-Pardo, José María[1]; Martínez Inglés, María Teresa[1]; Martínez Barberá, Humberto[2]

Resumen. La transformación digital del entorno marítimo ha incrementado la dependencia de sistemas de vigilancia, navegación y mando que integran información AIS sin mecanismos robustos de autenticación y validación contextual, lo que convierte este ecosistema en un espacio especialmente expuesto a riesgos de ciberseguridad y manipulación informacional. En este contexto, el presente trabajo analiza el *spoofing* AIS (manipulación o falsificación) como una capacidad ciberfísica de engaño orientada a alterar la percepción operativa del adversario mediante la generación de contactos falsos, trayectorias simuladas y patrones de tráfico artificialmente construidos para confundir o distraer.

El trabajo tiene como finalidad demostrar que el *spoofing* AIS no constituye solo una vulnerabilidad teórica del entorno marítimo digital, sino una capacidad técnicamente realizable y operacionalmente explotable en

[1] Universidad Politécnica de Cartagena.
[2] Universidad de Murcia.

el ámbito de la defensa. En particular, la investigación analiza su posible implementación tanto desde un submarino de la serie S-80 como desde plataformas no tripuladas, sobre todo drones de superficie (USV), poniendo de relieve su utilidad como herramienta de decepción electrónica, guerra de la información y alteración deliberada del entorno sensorial marítimo.

La relevancia de esta línea de investigación trasciende el plano conceptual. Según información pública, una iniciativa doctoral orientada a incrementar la capacidad de reconocer y efectuar perturbaciones sobre señales de navegación, fue probada con éxito durante las maniobras MARBORAN-25, lo que aporta un importante respaldo empírico y sitúa esta problemática en un escenario de interés real para las operaciones navales contemporáneas. Este hecho refuerza la necesidad de estudiar el *spoofing* AIS no solo como amenaza de ciberseguridad marítima, sino también como un potencial instrumento de acción táctica dentro de operaciones multidominio.

Desde la perspectiva técnica, el trabajo aborda la generación controlada de tramas AIS sintéticas, su coherencia cinemática y la posibilidad de desplegar emisores distribuidos para construir escenarios plausibles, creíbles y difíciles de identificar. Desde la perspectiva operativa, analiza cómo esta capacidad puede contribuir a degradar la conciencia situacional del adversario, forzar errores de clasificación, saturar sensores, desviar recursos de vigilancia y respuesta o enmascarar movimientos reales de unidades propias.

En consecuencia, se sostiene que el *spoofing* AIS debe entenderse no solo como una debilidad explotable de los sistemas marítimos conectados, sino como una capacidad emergente de alto valor táctico y de ciberseguridad en un entorno donde la superioridad informacional resulta decisiva.

Palabras clave: *Spoofing* AIS, Ciberseguridad marítima, Decepción operativa, Submarinos S-80, Sistemas no tripulados, Guerra de la información, Conciencia situacional marítima, Defensa naval, Seguridad marítima, Operaciones multidominio.

28 – Grados de libertad en sistemas CRPA: menos elementos no siempre es menos protección

Autores: Gómez-López, Miguel[1]; Núñez-Ortuño, José María[2]

Resumen. Las antenas de patrón de recepción controlado (CRPA, *Controlled Reception Pattern Antenna*) son una de las soluciones estándar para la protección *anti-jamming* de receptores GNSS en entornos hostiles. Sin embargo, existe una interpretación extendida y errónea sobre su capacidad real: se asume habitualmente que un sistema CRPA de N elementos puede hacer frente a un máximo de N *jammers* simultáneos, asignando un nulo a cada interferidor. Este trabajo demuestra que dicha interpretación es incompleta y, en ciertos escenarios operativos, conduce a conclusiones incorrectas sobre el dimensionamiento del sistema.

La capacidad fundamental de una CRPA de N elementos no reside en el número de nulos que puede generar, sino en los N grados de libertad que posee para deformar su diagrama de radiación. Esta distinción tiene consecuencias prácticas directas: un sistema de dos elementos, teóricamente limitado a un único nulo, puede sobrevivir a un número arbitrario de *jammers* simultáneos, siempre que su distribución espacial sea adecuada.

[1] Universidad Carlos III de Madrid.
[2] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.

En particular, si múltiples interferidores se encuentran suficientemente alejados y concentrados en una misma región angular –como *jammers* provenientes del norte a gran distancia—, el sistema puede tratar su contribución combinada como una única perturbación espacial y anularla de forma efectiva con un solo grado de libertad, manteniendo la recepción de las señales de satélite desde el resto del hemisferio.

Por el contrario, un escenario con solo tres *jammers* puede resultar inmanejable para esa misma CRPA de dos elementos si las fuentes de interferencia se distribuyen en direcciones angularmente separadas —por ejemplo, dos *jammers* próximos desde el norte y un tercero desde el sur–. En este caso, los grados de libertad del sistema quedan saturados y la protección se degrada severamente, con independencia de la potencia o distancia de los interferidores.

Estos resultados se validan tanto mediante simulación como con medidas experimentales en entornos reales, ilustrando que el criterio de diseño de una CRPA debe basarse en la diversidad angular esperada de las amenazas, y no exclusivamente en su número. El mensaje principal es claro: el parámetro crítico es la separabilidad espacial de los *jammers*, y optimizar la geometría del *array* puede ser más determinante que aumentar el número de elementos.

Palabras clave: Antena de patrón de recepción controlado (CRPA), *Anti-jamming* GNSS, Interferencia intencional, GNSS, PNT resiliente.

31 – Detección por radiofrecuencia de drones DJI y enlaces LoRa: análisis de señal y capacidades operativas

Autores: Moral Pérez, Alejandro[1]; Blázquez García, Rodrigo[2]; Burgos García, Mateo[2]

Resumen. El crecimiento exponencial de los sistemas aéreos no tripulados (UAS) y su empleo en actividades ilícitas o zonas críticas plantea importantes desafíos de seguridad. En este contexto, los sistemas antidron (C-UAS) basados en la detección de las señales de control y vídeo empleadas por los drones mediante la vigilancia del espectro de radiofrecuencia (RF) se posicionan como una solución técnica fundamental, permitiendo la detección temprana, identificación y localización de estas amenazas de forma pasiva.

En este trabajo, empleando dispositivos de radio definida por *software* (SDR), se analizan de manera experimental las señales basadas en saltos de frecuencia (*Frequency Hopping*) utilizadas habitualmente por los drones DJI para sus enlaces de mando y control, así como las señales OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) empleadas para la transmisión de vídeo en las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz. Por otra parte, se

[1] Universidad Politécnica de Madrid.
[2] Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad (ISDEFE-UPM).

analizan experimentalmente las características de las señales LoRa (*Long Range*) transmitidas por sistemas comerciales en la banda de 433 MHz que pueden embarcarse en drones.

Paralelamente al estudio de estas señales, se proponen algoritmos de detección adaptativos basados en el análisis del espectrograma. Para las señales LoRa, se muestra que la aplicación de la transformada de radón sobre el espectrograma permite explotar el patrón de la modulación CSS (*Chirp Spread Spectrum*) para identificar los barridos lineales en frecuencia y extraer parámetros críticos como el *spreading factor* (SF), demostrando robustez incluso en entornos con relaciones señal a ruido (SNR) bajas (hasta -15 dB).

Adicionalmente, se realiza un análisis de las capacidades operativas de los sistemas de detección de drones basados en la monitorización de señales de RF. Para ello, se evalúa el balance del enlace para determinar los alcances máximos de detección en diversas bandas (433 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz y 5.8 GHz) y se lleva a cabo un estudio de precisión y resolución angular mediante la aplicación de radiogoniometría, comparando diferentes topologías de agrupaciones de antenas.

Palabras clave: Detección, C-UAS, Drones, Vigilancia espectral, LoRa.

128 – Perfilado táctico de dispositivos inalámbricos para defensa perimetral

Autores: Venturi, Andrea[1]; Agesta Pérez-Ilzarbe, Ibai[1]; Paredes García, Daniel[1]; Ferrer Cacabelos, José Joaquín[2]

Resumen. La proliferación de dispositivos inalámbricos (wifi, Bluetooth) en los entornos operativos modernos representa una vulnerabilidad táctica, en especial cuando se aplican en infraestructuras críticas. En caso de necesidades técnicas forenses, se pueden usar para rastrear los actores hostiles y el personal no autorizado a través de su huella digital, sin embargo, el uso de contramedidas de anonimización, como la aleatorización de direcciones MAC y el elevado volumen de ruido electromagnético ambiental complican severamente la identificación continua y fiable de objetivos. En el marco del proyecto PROFAILI, superar esta barrera es un requisito crítico para la defensa, donde la detección de grupos de individuos o dispositivos coordinados en tiempo real resulta vital para la seguridad perimetral. En este sentido, se aborda una limitación habitual de los sistemas de monitorización clásicos, los cuales fallan al intentar correlacionar señales fragmentadas, tratando cada paquete anonimizado como una entidad distinta y saturando la toma de decisiones.

[1] Vicomtech.
[2] Teknei.

Para abordar este desafío, se presenta un sistema de inteligencia de señales pasivo que desplaza el foco hacia la identificación estructural subyacente mediante inteligencia artificial. La solución central propone una arquitectura jerárquica basada en teoría de grafos para la correlación multifuente. Las tramas interceptadas actúan como nodos y las aristas se establecen mediante matrices de similitud multidimensionales que evalúan la potencia de la señal, la coocurrencia temporal y la huella digital estructural del *hardware* (*fingerprinting*). Sobre este grafo se aplican algoritmos de detección de comunidades y modelos de machine learning no supervisado para agrupar de forma probabilística paquetes anónimos, reconstruyendo la identidad unívoca de un dispositivo físico o individuo. Asimismo, para asegurar un despliegue operativo en el terreno táctico (Edge AI), se han estudiado estrategias para convertir la arquitectura de detección a redes neuronales de impulsos (SNN) para su ejecución en *hardware* neuromórfico de ultrabajo consumo.

En escenarios de validación, este prototipo ha sido evaluado frente a tácticas de evasión complejas como la aleatorización MAC, demostrando una capacidad excepcional para perfilar dispositivos y logrando asociar de manera correcta y consistente las tramas interceptadas con sus verdaderos emisores físicos. Por su capacidad para descubrir la topología de grupos encubiertos de forma no intrusiva y su viabilidad de implementación en sensores tácticos aislados, este trabajo contribuye a fortalecer las capacidades de alerta temprana y protección de infraestructuras críticas en el ámbito de la defensa.

Palabras clave: Desanonimización MAC, Defensa perimetral, Dispositivos inalámbricos, Wifi.

185 – Aplicación de redes generativas antagónicas (GAN) sobre espectrogramas de RF en escenarios de guerra electrónica

Autor: Ayuso Ferrón, Cristian[1]

Resumen. La creciente complejidad del espectro electromagnético en escenarios de conflicto moderno plantea nuevas exigencias a los sistemas de guerra electrónica (GE). Este trabajo presenta una línea de investigación orientada a integrar técnicas de inteligencia artificial generativa, concretamente redes generativas antagónicas (GAN), con sistemas de radio definida por *software* (SDR), con el objetivo de desarrollar capacidades de síntesis de señales de radiofrecuencia (RF) para su aplicación en escenarios de guerra electrónica.

El enfoque central consiste en transformar señales RF al dominio tiempo-frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), obteniendo representaciones espectrales en forma de espectrogramas que pueden tratarse como imágenes. Este tratamiento permite aplicar arquitecturas GAN al procesado de señales, tecnología que en su formulación original enfrenta dos redes neuronales en un proceso de entrenamiento competitivo: una red generadora, encargada de producir muestras

[1] Grupo de investigación GRC – Universidad Politécnica de Madrid.

sintéticas cada vez más realistas, y una red discriminadora, que evalúa su autenticidad. A medida que ambas redes se perfeccionan mutuamente, el generador adquiere la capacidad de sintetizar contenido de alta fidelidad indistinguible de los datos reales. Aplicado al dominio RF, esto abre la posibilidad de generar emisiones sintéticas que emulen firmas electromagnéticas legítimas con suficiente coherencia técnica como para engañar a sistemas de monitorización del espectro, lo que constituye la base del *spoofing* de señales y las tácticas de engaño táctico.

Como parte del trabajo experimental, se ha verificado el proceso completo de síntesis: a partir de una representación espectral, es posible recuperar la señal en el dominio temporal mediante la transformada inversa de Fourier y transmitirla directamente a través de una SDR. Este resultado confirma la viabilidad técnica del sistema y sienta las bases para que un modelo GAN, cuidadosamente modelado y entrenado con conjuntos de señales reales, pueda generar emisiones coherentes con un escenario electromagnético determinado. Actualmente, se están evaluando distintas arquitecturas y refinando el proceso de entrenamiento sobre imágenes espectrales reales, con resultados preliminares prometedores.

Esta investigación se enmarca en la convergencia entre el procesado digital de señales y la IA generativa como vector de innovación para la superioridad en el espectro radioeléctrico. La capacidad de sintetizar emisiones electromagnéticas convincentes y adaptadas al escenario puede representar una ventaja diferencial significativa en un conflicto moderno, donde el dominio del espectro es cada vez más determinante para el éxito de las operaciones.

Palabras clave: Guerra electrónica, Inteligencia artificial generativa, Redes generativas antagónicas, Radiofrecuencia, Espectrogramas, Radio definida por *software*, Síntesis de señales, Engaño táctico, Superioridad en el espectro.

Área 3
TECNOLOGÍAS COMUNES A SISTEMAS DE DEFENSA

3.1
Ciclo de vida

76 – Gestión de la corrosión atmosférica en entornos militares: mecanismos, mitigación y sostenibilidad operativa

Autores: Molas, Silvia[1]; Pérez-Alonso, Alejandro[1]; Martínez-Gutiérrez, Axel[1]; Bahillo, Marc[1]; Concustell, Amadeu[1]

Resumen. La corrosión atmosférica constituye uno de los principales mecanismos de degradación en sistemas de defensa, con un impacto directo en la disponibilidad operativa, la seguridad y el coste del ciclo de vida. Aunque su acción es progresiva y no catastrófica en la mayoría de los casos, su efecto acumulativo compromete la integridad de estructuras y equipos críticos.

A escala global, se estima que el coste asociado a la corrosión alcanza aproximadamente el 3-4 % del PIB mundial, según estudios de NACE International (actual AMPP), lo que pone de manifiesto su relevancia como problema industrial y estratégico. En el sector de defensa, este fenómeno resulta especialmente crítico debido a la elevada exigencia operativa y a la exposición frecuente a entornos agresivos.

Diversos informes técnicos y análisis del ciclo de vida de sistemas militares indican que una parte significativa de los costes de mantenimiento está relacionada con la corrosión, aunque la proporción varía según el sistema,

[1] EURECAT.

el entorno operativo y las prácticas de mantenimiento. En sistemas navales, la exposición continua a ambientes marinos o costeros incrementa notablemente las necesidades de inspección, reparación y protección.

La aplicación de estrategias integradas de gestión de la corrosión –incluyendo selección de materiales, recubrimientos protectores, diseño orientado a la durabilidad y mantenimiento preventivo– puede reducir de forma significativa los costes asociados, dependiendo del sistema y su implementación.

La corrosión atmosférica puede considerarse una «amenaza silenciosa», ya que no provoca fallos inmediatos, pero degrada progresivamente los materiales, incrementa los costes de operación y mantenimiento y afecta a la fiabilidad de los sistemas.

Para mitigar sus efectos, se requiere la caracterización del entorno de exposición (costero, desértico, tropical o frío), ya que estas condiciones determinan los mecanismos de corrosión. Esto permite definir materiales, recubrimientos, diseños y planes de mantenimiento adecuados. Así pues, la monitorización de las condiciones climáticas y de la corrosión ambiental se consolida como herramienta clave para optimizar la gestión del ciclo de vida.

En esta ponencia, se presentan los mecanismos de corrosión atmosférica en el ámbito de defensa, así como estrategias de mitigación y tecnologías de monitorización utilizadas con el fin de prolongar la vida útil de materiales, componentes y sistemas expuestos en entornos militares.

Palabras clave: Corrosión atmosférica, Monitorización, Materiales.

85 – La economía circular como vector emergente en los materiales avanzados para el sector defensa: perspectiva nacional desde el punto de vista de la plataforma tecnológica MATERPLAT

Autores: Ledo Bañobre, Raquel[1]; García Murias, Denise[1]; Tielas Macía, Alberto[1]

Resumen. La transición hacia modelos más sostenibles en el ámbito de la defensa está ganando relevancia en Europa y en España, impulsada por la necesidad de asegurar la autonomía estratégica, la resiliencia industrial y el acceso a materias primas críticas. En este contexto, la economía circular aplicada a los materiales avanzados constituye un enfoque emergente cuyo grado de implantación en el sector defensa es todavía incipiente, pero claramente alineado con las orientaciones identificadas a nivel nacional en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) y en las prioridades tecnológicas recogidas por MATERPLAT como Plataforma Tecnológica Española de Materiales Avanzados y Nanomateriales.

[1] MATERPLAT - Plataforma Tecnológica Española de Materiales Avanzados y Nanomateriales.

LA ETID 2026 identifica prioridades tecnológicas donde los materiales desempeñan un papel habilitador clave (por ejemplo, en plataformas terrestres, navales y aéreas, sistemas espaciales, sensores, armas y municiones, así como infraestructuras) y en las que la durabilidad, la fiabilidad en entornos extremos y la reducción de dependencias críticas son factores determinantes. Aunque la estrategia no aborda de forma explícita la economía circular como eje central, sí incorpora conceptos estrechamente relacionados, como la resiliencia operativa, el sostenimiento a lo largo del ciclo de vida, la reducción logística y el aprovechamiento de tecnologías de uso dual.

Desde la perspectiva de MATERPLAT, la economía circular de materiales constituye una línea transversal prioritaria, junto con la fabricación avanzada, la nanotecnología y la modelización, con aplicaciones directas en materiales avanzados ampliamente utilizados en defensa, como es el caso de los *composites*, los metales de altas prestaciones o los materiales multifuncionales, entre otros.

Este trabajo presenta una revisión del estado actual de la aplicación de principios circulares en materiales avanzados utilizados en sistemas de defensa y presenta algunos casos de éxito dentro del ecosistema de MATERPLAT, como la extensión de vida útil mediante recubrimientos avanzados, la reparabilidad de componentes críticos, la reutilización controlada y el reciclado de alto valor, especialmente en materiales que incorporan elementos estratégicos, destacando oportunidades de avance en el aprovechamiento de materiales de uso dual y mediante innovación colaborativa civil-militar, así como con el uso de herramientas digitales de gestión del ciclo de vida útil. Para finalizar, este trabajo también presenta los resultados de la primera encuesta nacional sobre economía circular en materiales avanzados realizada por MATERPLAT, así como la hoja de ruta resultante, elaborada a partir de un amplio proceso de consulta a representantes del ecosistema nacional de I+D+i en materiales avanzados.

Palabras clave: Economía circular, Materiales avanzados, Nanomateriales, Defensa, Materiales de uso dual, Transición ecológica, Plataforma tecnológica, Hoja de ruta.

154 – Toma de decisiones de sostenimiento utilizando IA generativa en entornos *on-premise*

Autores: Pagan Rubio, José A.[1]; Ortiz García, Juan Jesús[1]; Oterino Bono, Roberto[1]; Arregui Arias, Andrea Belén[1]; Méndez Macias, Miguel[1]

Resumen. La inteligencia artificial (IA) generativa está redefiniendo la manera en que los sistemas complejos pueden operarse, mantenerse y sostenerse a lo largo de todo su ciclo de vida. En el ámbito naval de defensa, su verdadero potencial no se limita a generar respuestas en lenguaje natural, sino a convertir grandes volúmenes de datos técnicos dispersos en conocimiento accionable y en decisiones operativas de alto valor. Este cambio de paradigma resulta sobre todo relevante en plataformas críticas, donde la disponibilidad, la seguridad y la rapidez de respuesta condicionan directamente la misión.

Con esta visión, Navantia ha desarrollado un prototipo pionero de asistente inteligente de sostenimiento embarcado, basado en una arquitectura de agentes de IA generativa especializados, conectados a grafos de conocimiento y desplegables en entorno *on-premise* a bordo del buque. La solución integra de forma unificada múltiples fuentes de información tradicionalmente desacopladas: configuración logística, datos de

[1] Navantia.

funcionamiento, modelos de simulación, capacidades predictivas y documentación técnica real de sistemas navales. Esta convergencia permite construir una comprensión contextualizada del estado del sistema, de sus relaciones funcionales y de las acciones de mantenimiento más adecuadas en cada situación.

Frente a enfoques convencionales centrados en la consulta documental o en la monitorización aislada, el prototipo aporta una capacidad diferencial: combina razonamiento generativo, búsqueda activa de información, trazabilidad del conocimiento y analítica predictiva para detectar, diagnosticar y recomendar actuaciones de sostenimiento de forma natural, explicable y orientada a la decisión. De este modo, se evoluciona desde un acceso pasivo a la información hacia una asistencia inteligente, proactiva y contextual, capaz de apoyar al operador y al mantenedor en escenarios de elevada criticidad.

La demostración se ha realizado sobre la planta de propulsión de un buque, uno de los sistemas con mayor impacto en la disponibilidad y la seguridad de la plataforma. Los resultados posicionan esta aproximación como un habilitador clave de la próxima generación de soluciones de sostenimiento naval: asistentes embarcados inteligentes capaces de acelerar el diagnóstico, reducir tiempos de respuesta, reforzar la seguridad en la mar, optimizar el coste de ciclo de vida y sentar las bases de un sostenimiento más autónomo, resiliente y eficaz.

Palabras clave: IA generativa, Toma de decisiones, Asistente, Modelo predictivo, *On-premise*.

157 – Avances en la monitorización del estado de aeronaves: detección de la emisión acústica asociada a mecanismos de corrosión

Autor: Abarkane, Chihab[1]

Resumen. El mantenimiento de aeronaves es crucial en los sectores militar y aeroespacial debido a las extremas condiciones operativas, donde la corrosión impacta significativamente la vida útil de los equipos. Frente a las estrategias tradicionales de mantenimiento, el enfoque basado en la condición ofrece una forma más eficaz y económica de monitorizar el estado de las aeronaves expuestas a ambientes corrosivos.

El proyecto SCORPENES (n.º B.PRJ.RT.905), impulsado por la Agencia Europea de Defensa (EDA) y respaldado por seis países de la UE (Francia, Portugal, España, Finlandia, Rumanía y Eslovaquia), busca desarrollar un sistema de mantenimiento basado en la condición para gestionar la corrosión en helicópteros y aeronaves. Este enfoque permite programar el mantenimiento de manera proactiva, mejorando la prevención y la eficiencia de costes. A través de la colaboración entre entidades militares, proveedores aeronáuticos y organizaciones de investigación, el proyecto combina la monitorización de la corrosión y del entorno en pruebas de vuelo, ensayos de corrosión acelerada y un modelo predictivo, relacionando el

[1] Fundación CIDETEC.

entorno operativo de helicópteros con el riesgo de corrosión para una gestión del mantenimiento óptima.

Este trabajo presenta el potencial de la técnica de emisión acústica (EA) para detectar las primeras etapas de fenómenos de corrosión que se producen en materiales aeronáuticos. Para ello, se monitorizaron con sensor de EA muestras de aleación de aluminio AA2024 recubiertas con esquemas de protección convencionales, mientras se exponían en laboratorio en condiciones de entorno marino. Los resultados derivados del análisis de los datos de EA, junto con la caracterización *post mortem*, revelaron la capacidad de la técnica para detectar en tiempo real mecanismos relacionados con la corrosión, tales como la delaminación de pintura, la fisuración de productos de corrosión o la formación de burbujas. Las señales características de EA, con un contenido en frecuencia bien diferenciado, se relacionaron con dichos mecanismos y resultaron consistentes a lo largo de tres ensayos de corrosión diferentes: filiforme, galvánico y de gota.

La técnica de emisión acústica ha demostrado una capacidad de detectar y distinguir mecanismos de corrosión en diferentes ensayos de corrosión e, incluso, de revelar la dinámica de los fenómenos de corrosión, lo que permite comprender el proceso que subyace a la degradación por corrosión.

Los próximos pasos de esta investigación se dirigen hacia un examen más profundo de los datos de emisión acústica. Esto permitirá caracterizar las señales específicas de EA, con vistas a la monitorización de la corrosión *in situ*.

Palabras clave: Proyecto defensa, Monitorización de la corrosión, Emisión acústica, Mantenimiento de aeronaves.

220 – Termografía inteligente para el mantenimiento predictivo de lubricantes en vehículos pesados de interés para la Defensa

Autores: Moreno-Haya, Fernando[1]; Ortiz-Chiliquinga[2]; Yenes-Gallego, José Ignacio[3]; Santos-Santos, Leopoldo[3]; López-Pingarrón, Carlos[3]; Sanco Pareja, Lara[2]; Torrecilla, José S.[4]

Resumen. La disponibilidad operativa de vehículos pesados de uso dual, especialmente en el ámbito de la defensa, depende en gran medida del estado de sus lubricantes. Los métodos convencionales de análisis de aceite, aunque precisos, requieren toma de muestra, envío a laboratorio y tiempos de respuesta incompatibles con una toma de decisiones rápida en escenarios operativos. En este trabajo, se presenta una metodología innovadora, no destructiva y automatizada para la monitorización predictiva de aceites lubricantes mediante termografía infrarroja y aprendizaje profundo.

El estudio se centró en dos lubricantes de elevada relevancia logística en vehículos militares: el aceite O-1178, empleado en transmisiones y cajas de cambio, y el aceite O-1236, utilizado en motores diésel. Las

[1] Laboratorio Central del Ejército - Ejército de Tierra.
[2] Dpto. Ingeniería Química y de Materiales, Universidad Complutense de Madrid.
[3] Escuela Politécnica Superior del Ejército - Ejército de Tierra.
[4] Universidad Complutense de Madrid.

muestras fueron clasificadas previamente como conformes o no conformes mediante análisis fisicoquímicos normalizados, incluyendo viscosidad, índice de acidez, contenido en agua, residuos carbonosos y presencia de metales de desgaste. Posteriormente, se registraron secuencias termográficas durante el enfriamiento controlado de las muestras, generando una base de datos de más de diez mil imágenes infrarrojas.

Para la clasificación automática se evaluaron distintas arquitecturas de redes neuronales convolucionales, seleccionándose finalmente ResNet-34 y ResNet-50 por su equilibrio entre capacidad predictiva, robustez y eficiencia computacional. Los modelos fueron entrenados y validados con particiones estratificadas, evitando la fuga de información entre subconjuntos. Los resultados demostraron prestaciones muy elevadas, con exactitudes superiores al 99 %. En particular, el modelo ResNet-34 completamente ajustado alcanzó una sensibilidad del 100 % en la detección de muestras no conformes para ambos lubricantes, eliminando falsos negativos en la clase crítica. Este aspecto resulta esencial en mantenimiento predictivo, donde aceptar como válido un aceite degradado puede comprometer la seguridad, la disponibilidad del sistema y la vida útil de los equipos.

Además, el empleo de mapas Grad-CAM permitió interpretar las decisiones del modelo, mostrando que la red se basa en patrones térmicos físicamente coherentes asociados a procesos de degradación, contaminación, oxidación y presencia de partículas metálicas. La metodología propuesta ofrece una herramienta rápida, objetiva y potencialmente desplegable en entornos operativos, reduciendo cambios innecesarios de aceite, residuos peligrosos y costes logísticos. En conjunto, el trabajo aporta un marco avanzado para el mantenimiento inteligente de plataformas terrestres de Defensa y otros sistemas industriales críticos.

Palabras clave: Termografía infrarroja, Monitorización de lubricantes, Mantenimiento predictivo, Tribología, Aprendizaje profundo.

236 – Modelado predictivo de corrosión en aceros navales mediante aprendizaje automático: plataforma Kimiko para el mantenimiento inteligente de buques

Autores: Abenza, Eduardo[1]; Alonso Garrido, César[1]

Resumen. La corrosión de los aceros empleados en el casco de buques de guerra constituye un problema crítico para la disponibilidad operativa, la seguridad estructural y los costes de mantenimiento de las armadas. En entornos marinos, la exposición continuada a agua salina, variaciones de temperatura, oxígeno disuelto, *biofouling* y condiciones de operación heterogéneas acelera los procesos de degradación, generando incertidumbre sobre la vida útil real de los materiales. Los métodos tradicionales de inspección y predicción, basados en modelos empíricos, normas como API 579, leyes potenciales e inspecciones periódicas, resultan insuficientes para anticipar con precisión la evolución de la corrosión y optimizar las intervenciones de mantenimiento.

En este trabajo, se presenta Kimiko, una plataforma inteligente desarrollada en el marco del PERTE Naval en colaboración con Navantia, orientada a la predicción de vida útil de aceros en ambiente marino y a la transición desde estrategias de mantenimiento programado hacia modelos

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.

de mantenimiento predictivo basados en el estado real del activo. La plataforma integra tres enfoques complementarios. En primer lugar, incorpora modelos electroquímicos clásicos, incluyendo diagramas de Pourbaix, análisis de Tafel y ecuaciones de Butler-Volmer, para representar los mecanismos fundamentales de corrosión y pasivación. En segundo lugar, emplea simulaciones atómicas de la interfaz acero-agua de mar mediante dinámica molecular con el fin de analizar interacciones locales, procesos de adsorción y fenómenos de degradación a escala microscópica. En tercer lugar, integra modelos predictivos de aprendizaje automático entrenados sobre bases de datos especializadas de corrosión complementadas con datos experimentales proporcionados por Navantia.

Desde el punto de vista tecnológico, Kimiko cuenta con una arquitectura modular basada en microservicios, interfaz web, visualización atómica, seguimiento experimental y una base de datos relacional estructurada en seis dominios: navíos, rutas, materiales, experimentos, condiciones ambientales y resultados. Asimismo, la plataforma contempla microservicios de inferencia en contenedores confidenciales para proteger información sensible.

Los resultados esperados permiten reducir inspecciones innecesarias, priorizar intervenciones críticas, anticipar fallos estructurales y aumentar la disponibilidad operativa de plataformas navales militares, contribuyendo a una gestión más eficiente, segura y sostenible del ciclo de vida del buque.

Palabras clave: Corrosión naval, Aprendizaje automático, Gemelo digital, Mantenimiento predictivo, Aceros de casco, Simulación atómica.

3.2
Materiales

15 – Método para la evaluación de la protección otorgada por un blindaje mediante el ensayo de V50

Autor: Suanes, Gonzalo[1]

Resumen. El proceso de diseño de un blindaje enfrenta un problema: puede determinarse si el blindaje resiste la amenaza considerada, pero no si está sobredimensionado. Debido a las restricciones de peso a las que están sujetos los blindajes, estos deben optimizarse en la medida de lo posible. Optimizar un blindaje mediante el método de ensayo y error con ensayos de penetración, puede tener un precio prohibitivo. Por otro lado, el ensayo de V50, de resultados cuantitativos, solo permite el estudio del blindaje lejos de su zona de trabajo.

Sin embargo, las pruebas de aceptación de chalecos de protección balística al ET han permitido realizar un análisis estadístico sobre el resultado de los ensayos de V50. A partir del resultado de los análisis se ha determinado que el estudio debe realizarse en términos de energía cinética.

El estudio de la relación entre la probabilidad de penetración de la muestra y la velocidad y energía cinética del proyectil, demuestra que existe una relación entre las mismas que sigue aproximadamente una distribución normal acumulada, cuya media es el resultado de un ensayo de V50

[1] INTA.

(E50) y cuya desviación típica es el 7 % de la E50. Este resultado permite evaluar la respuesta de un blindaje frente a una amenaza mediante un ensayo de V50. El resultado puede ayudar a acortar los tiempos y reducir los costes de desarrollo de nuevos tipos de blindaje.

Sin embargo, los resultados deben ser contrastados con más ensayos. Es posible que otros tipos de blindaje (cerámicos, acero balístico, etc.) reaccionen de forma diferente ante una variación de la energía cinética del proyectil incidente. Deben realizarse más ensayos para validar las predicciones de método descrito antes de aplicarlo al diseño de nuevos blindajes. Además, el método nunca debería sustituir al ensayo de penetración, que es el que permite acotar de forma exacta el nivel de confianza de un blindaje frente a una determinada amenaza.

Palabras clave: Ensayos balísticos, Diseño de blindajes, Reducción de peso.

33 – Desarrollo de recubrimientos anticorrosivos de última generación para la protección de plataformas en ambientes agresivos

Autoras: Prado García, Marta[1]; Conejero Iglesias, Olga[1]

Resumen. La protección de plataformas militares frente a la corrosión en entornos agresivos constituye un desafío tecnológico de primer orden. Estas estructuras están sometidas a condiciones ambientales extremas que comprometen su integridad estructural, operatividad y vida útil, lo que hace imprescindible disponer de soluciones de protección superficial de alto rendimiento. En este contexto, el presente trabajo aborda el desarrollo de recubrimientos anticorrosivos avanzados basados en tecnología sol-gel, libres de cromo hexavalente (Cr(VI)), sustancia altamente tóxica cuyo uso está cada vez más restringido por la normativa europea REACH y la regulación ambiental internacional.

La investigación se centra en la formulación de recubrimientos híbridos orgánico-inorgánicos sobre sustratos de acero galvanizado, material ampliamente utilizado en estructuras y componentes de defensa expuestos

[1] Fundación Idonial.

a ambientes marinos, húmedos o industriales. La combinación de precursores de silicio como TEOS y GPTMS ha permitido obtener matrices con propiedades mecánicas mejoradas –menor tendencia al agrietamiento– junto con una excelente adherencia al sustrato metálico.

Un aspecto clave del desarrollo ha sido la incorporación de inhibidores de corrosión en diferentes concentraciones a la formulación sol-gel, entre los que destacan nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), nitratos de lantano, cerio y zirconio. Estos agentes actúan como barrera activa frente a los procesos electroquímicos de degradación. Los recubrimientos resultantes fueron evaluados mediante ensayos normalizados en cámara de niebla salina neutra (UNE-EN ISO 9227) durante setecientas quince horas. Los resultados demuestran una mejora muy significativa frente al acero galvanizado sin proteger: la aparición de óxido blanco se retrasa de dos horas y media a más de quinientas cuarenta horas con los inhibidores óptimos. Las formulaciones con nanopartículas de ZnO al 1 % y nitrato de zirconio al 0,75 % han obtenido los mejores resultados, con porcentajes de óxido blanco del 1 % y 0,5 %, respectivamente al término del ensayo sin detectarse óxido rojo tras setecientas quince horas de exposición. Adicionalmente, todos los recubrimientos presentan excelente adherencia al sustrato metálico, clasificándose en categoría 0 según la norma UNE-EN ISO 2409.

Estos resultados avalan el potencial de esta tecnología sol-gel para su aplicación industrial en el sector defensa, ofreciendo una alternativa robusta, sostenible y de alto rendimiento para la protección anticorrosiva de plataformas sometidas a condiciones ambientales severas en línea con los requisitos normativos de eliminación del cromo hexavalente y las necesidades de durabilidad del sector defensa.

Palabras clave: Recubrimientos sol-gel, Protección anticorrosiva, Cromo hexavalente, Nanopartículas, Inhibidores.

34 – Caracterización electromagnética y microestructural del polvo Ti-6Al-4V para el diseño de metamateriales mediante fabricación aditiva

Autores: García Martínez, María[1]: García Juárez, Álvaro[2]; Ramos Somolinos, David[1]; Redondo Torrico, Nuria[1]; Hernández Santandreu, Marta[1]; Fernández de la Torre, Diego[1]; Herrera Hernández, Alejandro[1]; García Hidalgo, Javier[2]; Berges Serrano, Cristina[2]; Herranz Sánchez-Cosgalla, Gemma[2]; García-Martínez, Juan[1]

Resumen. El proyecto BRISAS tiene como objetivo el desarrollo de metamateriales funcionales para aplicaciones en defensa y seguridad mediante fabricación aditiva (FA). La caracterización exhaustiva del material de partida, polvo de aleación Ti-6Al-4V grado 5 atomizado en gas (D < 25 μm), resulta imprescindible para garantizar la trazabilidad entre las propiedades de las mezclas imprimibles y las del componente fabricado, así como para validar su idoneidad en aplicaciones operativas de alto requerimiento.

Se ha desarrollado una campaña de caracterización multimodal del polvo, integrando técnicas complementarias que cubren los aspectos composicionales, microestructurales, de desgasificación y electromagnéticos.

[1] INTA.
[2] UCLM.

La composición química se determinó mediante EDX, fusión con gas inerte para H, N y O, y combustión para C, confirmando la conformidad con la especificación Ti-6Al-4V grado 5. La morfología y microestructura de las partículas se analizaron mediante FE-SEM con microanálisis EDX, evaluando esfericidad, distribución granulométrica, presencia de partículas satélite y homogeneidad composicional interparticular. La identificación de las fases presentes (α/β) se realizó mediante microscopía óptica sobre secciones metalográficas transversales del polvo.

La aptitud del polvo para entornos de vacío extremo espacial se verificó mediante ensayo de desgasificación (*outgassing*) conforme a ECSS-Q-ST-70-02C, obteniendo niveles despreciables de pérdida de masa y materia condensable volátil sin detección de contaminantes moleculares.

La caracterización electromagnética constituye el aspecto más innovador de este trabajo. Mediante un método no destructivo basado en línea de transmisión (10 MHz – 8 GHz), se determinaron la permitividad y permeabilidad complejas del polvo, confirmando su comportamiento dieléctrico con valores de permitividad estables hasta aproximadamente 3.5 GHz y bajas pérdidas eléctricas. Esta caracterización en formato polvo, escasamente abordada en la bibliografía, permite establecer una línea base para correlacionar las propiedades electromagnéticas del polvo y las mezclas imprimibles con las del material consolidado por FA, de interés directo para el diseño de metamateriales.

En fases posteriores se caracterizará el ligante (actualmente en proceso de diseño) y, una vez disponibles las piezas fabricadas por extrusión de metal (MEX), se realizará la caracterización microestructural, mecánica y electromagnética antes y después de consolidar, estableciendo la correlación polvo-componente impreso para el diseño de metamateriales en defensa. Como trabajo futuro, se abordará la caracterización sistemática a lo largo de todas las etapas del proceso, identificando la evolución microestructural y electromagnética inducida por cada fase del procesado.

Palabras clave: Aplicaciones espaciales, Fabricación aditiva, Ti-6Al-4V, Caracterización microestructural, Permitividad dieléctrica, Metamateriales, *Outgassing*.

68 – Efecto de la turbulencia en la respuesta a corrosión de bronces de elevada aleación en medios marinos contaminados con azufre

Autoras: Merino Galván, Lourdes[1]; Biezma Moraleda, María Victoria[1]

Resumen. El bronce al aluminio y níquel (NAB) y el bronce al aluminio y manganeso (MAB) son muy empleados para la fabricación de componentes críticos en el sector naval, tales como hélices navales y los rodetes de bombas, debido a su elevada resistencia a la corrosión y cavitación en medios marinos. Sin embargo, su comportamiento en condiciones más complejas, como entornos contaminados con azufre derivados de actividad microbiológica, junto con regímenes hidrodinámicos turbulentos, es un tema limitado en la literatura, a pesar de su relevancia en zonas portuarias o de baja renovación de agua.

En este estudio, se dedica la atención a evaluar el comportamiento de corrosión de ambos bronces de elevada aleación, de microestructura multifásica, empleando ensayos de corrosión potenciostático, empleando agua marina estancada salobre simulada (*artificial brackish water*, ABW), que contiene tioacetamida en su formulación y se introduce una turbulencia controlada en el sistema mediante agitación. El empleo de técnicas de

[1] Universidad de Cantabria.

caracterización microscópica permitió analizar el daño superficial y su profundidad ocasionado en los materiales.

Los resultados muestran que el NAB presenta una mayor sensibilidad que el MAB a la corrosión en ABW con turbulencia, asociada a la formación de capas de productos de corrosión poco adherentes, que se eliminan fácilmente bajo el flujo. Asimismo, en el MAB se observó que la turbulencia induce roturas locales de sus capas protectoras, incrementando la penetración del daño, sin una variación proporcional de la densidad de corriente. En ambos materiales se apreció una corrosión selectiva, desaluminización, fase con redepósito catódico de cobre.

Se concluye que la respuesta frente a corrosión en medios contaminados marinos, y bajo condiciones de turbulencia, está fuertemente condicionada por la estabilidad mecánica de los productos de corrosión formados, así como por la microestructura, en particular por la distribución, tamaño y morfología de las fases intermetálicas κ. Asimismo, la respuesta del material depende notoriamente del potencial seleccionado para los ensayos de corrosión.

Palabras clave: Bronces NAB y MAB, Corrosión con turbulencia, Agua de mar contaminada.

79 – Identificación y caracterización de impactos en aeroestructuras de material compuesto mediante técnicas de emisión acústica

Autores: Royo, José M.[1]; Calvo-Echenique, Andrea[1]; Calvo, Susana[1]; Núñez, José Luis[1]; Martín de la Escalera, Federico[2]

Resumen. La incorporación progresiva de elementos fabricados en polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymers*) en aeroestructuras ha supuesto una mejora significativa en términos de prestaciones estructurales, principalmente gracias a su elevado ratio rigidez/peso frente a los materiales metálicos tradicionales. No obstante, esta transición tecnológica ha introducido nuevos retos desde el punto de vista de la ingeniería estructural y del mantenimiento en servicio, relacionados con mecanismos de daño específicos del material, incertidumbres asociadas a su vida útil y la necesidad de emplear técnicas de inspección más avanzadas.

Entre estos retos, los daños por impacto apenas visibles (*Barely Visible Impact Damage*, BVID) representan un aspecto crítico debido a su

[1] Instituto Tecnológico de Aragón.
[2] Aernnova Engineering Division.

capacidad para generar deterioro interno significativo sin evidencias externas apreciables. A diferencia de lo que ocurre en estructuras metálicas, donde eventos comunes durante la operación y el mantenimiento –como la caída de herramientas, la proyección de grava en operaciones de despegue y aterrizaje, impactos con equipos de tierra o fenómenos meteorológicos adversos como el granizo– suelen dejar marcas visibles que permiten una evaluación inicial del daño, en los materiales compuestos estos mismos eventos pueden inducir daños internos cuya identificación requiere el uso de técnicas específicas de inspección no destructiva.

La correcta detección e identificación de impactos en aeroestructuras de material compuesto resulta esencial tanto desde el punto de vista de la seguridad como de la disponibilidad operativa de la plataforma. Una caracterización temprana y precisa del evento dañino permite planificar acciones de mantenimiento en función de la severidad real del daño, optimizando recursos al reducir tiempos de inspección o aumentar la disponibilidad del activo. Adicionalmente, esta capacidad presenta un claro carácter de uso dual, siendo aplicable también a la detección de eventos de mayor contenido energético, como impactos de tipo balístico.

En este contexto, se presenta una metodología para la identificación, localización y cuantificación de impactos mediante técnicas de emisión acústica en estructuras de CFRP de geometría compleja, incluyendo superficies de doble curvatura y elementos rigidizados. La solución desarrollada se basa en una red distribuida de sensores piezoeléctricos, un sistema de adquisición de señal analógica y una cadena de procesado de datos en tiempo real basada en técnicas de *machine learning*. A partir de la información obtenida, el gestor del activo puede tomar decisiones informadas sobre inspección, mantenimiento o reparación, evitando la revisión exhaustiva de grandes áreas estructurales y mejorando de forma significativa la eficiencia operativa.

Palabras clave: Emisión acústica, Piezoeléctrico, Impacto, *Machine learning*, CFRP, Localización, Cuantificación.

87 – Los metamateriales y sus revolucionarias aplicaciones multifuncionales

Autores: San Millán, Francisco Javier[1*]; Pflueger Tejero, Pablo[1,2]; Martínez Terés, Ignacio[2]; Vilasraj Bhat, Krishnaraj[2]; García-Martinez, Juan[2]; Montáns Leal, Francisco Javier[2,3]

Resumen. Los metamateriales (MM) son materiales artificiales diseñados para conseguir propiedades extraordinarias, no disponibles en los materiales naturales, mediante estructuras internas a escala micro o nano concebidas para una aplicación concreta. Estas estructuras pueden basarse en celdas unitarias repetitivas, patrones periódicos o aperiódicos, o gradientes espaciales que originan MM funcionalmente gradados. Su capacidad para transmitir o manipular ondas elásticas, electromagnéticas y acústicas, cargas mecánicas y térmicas, e incluso moléculas o partículas, abre aplicaciones que desafían los planteamientos convencionales. El auge de la fabricación aditiva o impresión 3D ha ampliado su desarrollo al eliminar limitaciones geométricas de los procesos clásicos. En el ámbito de los metamateriales mecánicos (MMM), INTA y UPM colaboran en investigaciones orientadas a Defensa y al sector aeroespacial. El trabajo presenta desarrollos en MMM auxéticos, caracterizados por un coeficiente

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).
[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio (ETSIAE),
[3] Universidad de Florida (UF).

de Poisson negativo y por expandirse perpendicularmente a la dirección de tracción, con aplicaciones en protección frente a explosiones, robótica, biomedicina, electrónica flexible y acústica. También se describen MMM y metaestructuras para el control y mitigación de vibraciones y microvibraciones en satélites, generadas por ruedas de reacción, mecanismos de orientación, sistemas criogénicos, antenas o paneles solares. Estos fenómenos limitan instrumentos de observación sensibles. Se muestran resultados de MMM de uso dual para atenuación de vibraciones, integrando inteligencia artificial en modelos subrogados robustos.

Palabras clave: Auxético, Fabricación aditiva, Inteligencia artificial, Metamateriales, Microvibraciones, Modelos subrogados.

150 – Selección y optimización de materiales en componentes críticos operativos: estudio aplicado a barras de torsión en plataformas militares

Autores: García Ojeda, Antonio Ignacio[1]; Peñalba Luna, Carlos[1]; Moral Jiménez, Manuel[1]; Lasagni, Fernando[2]; Gonzalez, Ramón[2]

Resumen. La integridad estructural de elementos sometidos a cargas cíclicas en sistemas de suspensión constituye un aspecto crítico en plataformas militares, donde la fiabilidad en condiciones severas de operación es un requisito indispensable. En este contexto, el presente trabajo analiza el comportamiento de barras de torsión, componentes diseñados para soportar elevados esfuerzos torsionales, absorbiendo irregularidades del terreno sin comprometer la seguridad estructural ni la operatividad del sistema. Se establecen los requisitos fundamentales que deben cumplir estos elementos, destacando la necesidad de una elevada resistencia a la fatiga por torsión –especialmente en superficie–, una adecuada tenacidad frente a la iniciación y propagación de grietas, así como estabilidad dimensional tras tratamientos térmicos. Asimismo, se analiza la influencia de los acabados superficiales y tratamientos asociados, incluyendo

[1] Ministerio de Defensa – Ejército de Tierra.
[2] Novaindef (Soluciones Sicnova).

procesos como el granallado (*shot peening*), el bruñido y la nitruración, como factores determinantes en la vida en servicio. El estudio evalúa el empleo de aceros de muelle aleados –principalmente sistemas Cr-V y Cr-Si— como alternativa a aceros de ultra alta resistencia tipo 300M, estableciendo una comparación basada en resistencia a fatiga, templabilidad, tenacidad y respuesta a tratamientos superficiales. A partir de este análisis, se propone el acero 51CrV4 (EN 1.8159) como solución óptima, al presentar un equilibrio favorable entre comportamiento a fatiga en torsión, robustez frente a daño y viabilidad industrial. Aunque su límite elástico es inferior al del 300M, su menor sensibilidad a defectos superficiales y su comportamiento en condiciones reales lo posicionan como una alternativa competitiva, con reducciones de coste en el ciclo de vida del orden del 25-35 %. Desde la perspectiva experimental, el trabajo aborda la caracterización microestructural y mecánica mediante ensayos de metalografía y dureza, permitiendo correlacionar la microestructura con el comportamiento en servicio y establecer criterios de optimización del material y su procesado. Los resultados permiten definir estrategias avanzadas de selección de materiales y tratamientos para optimizar el rendimiento de barras de torsión, incrementando la vida a fatiga y reduciendo costes. Asimismo, se identifican como un elemento crítico en el sostenimiento de plataformas del Ejército de Tierra, debido a las dificultades en la obtención de repuestos con niveles adecuados de calidad y plazos de suministro.

Palabras clave: Materiales, Metalografía, 300M, Plataformas terrestres, Fatiga, Sostenimiento, Ciclo de vida.

156 – Soluciones innovadoras de fabricación aditiva para Defensa

Autores: García, Miriam[1]; Pereira, Juan Carlos[1]; Mancisidor, Ane Miren[1]; Muñiz, Marta[1]; Aranzabe, Jon[1]

Resumen. La fabricación aditiva está transformando los procesos de producción y logística gracias a su capacidad de producir y reparar componentes mediante una respuesta rápida o en entornos remotos. La fabricación aditiva permite garantizar la fabricación española y europea de componentes críticos en defensa para aplicaciones como *new space*, reparación en campo o nuevas aeronaves y UAV, respondiendo con agilidad a las necesidades de las Fuerzas Armadas y asegurando la autonomía estratégica. Por ello, la fabricación aditiva como habilitador de la fabricación avanzada está incluida en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) como una tecnología clave. LORTEK como entidad experta en fabricación aditiva metálica pretende transferir los conocimientos adquiridos y soluciones tecnológicas desarrolladas durante años en el sector industrial de uso civil al sector defensa. Para ello, desarrolla dos proyectos EDF sobre fabricación aditiva metálica para demostrar las posibilidades de esta tecnología en diversos entornos. Por un lado, en el proyecto DISCMAM se han desarrollado soluciones para la reparación en campo de piezas mediante DED con asistencia remota. LORTEK ha

[1] LORTEK S.COOP.

implementado tecnología de deposición láser con hilo (DED-LB) para reparar piezas del tren motriz de sistemas terrestres, integrando escaneo 3D y reconocimiento semiautomático de geometrías, sistemas de visión *off-axis* y *on-axis* con captura de datos clave del proceso, una plataforma digital para monitorización remota en tiempo real, y un gemelo digital en una célula robótica para supervisar parámetros críticos y apoyar la toma de decisiones *go/no go*. El flujo de trabajo se ha validado en tres casos reales suministrados por ministerios de Defensa de España y Bélgica. Por otro lado, en el proyecto ROLIAC se ha desarrollado una estrategia de aseguramiento de la calidad durante la fabricación de piezas aeronáuticas obtenidas mediante PBF-LB. Para ello, se ha monitorizado el proceso de fabricación, midiendo los niveles de emisión generados durante la interacción láser-material y utilizando cámaras térmicas. Mediante la correlación de las señales obtenidas con datos de tomografía computerizada (CT) y utilizando algoritmos de *machine learning*, fue posible detectar defectos reales en las piezas fabricadas. Asimismo, se detectaron picos de temperatura en zonas críticas. Estos avances demuestran, por un lado, la factibilidad de la fabricación aditiva metálica como tecnología de fabricación de recambios y reparación en campo y, por otro lado, cómo la digitalización del proceso permite asegurar la calidad de las piezas fabricadas sin necesidad de realizar costosos ensayos posteriores, acelerando la fabricación y mejorando la logística.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Logística, Aseguramiento de la calidad, Metales.

171 – *Composites* basados en resinas biobasadas y reciclables para aplicaciones de altas prestaciones

Autora: Muñoz, Dulce[1]

Resumen. Este trabajo presenta diferentes enfoques sintéticos para obtener resinas epoxi mediante metodologías sostenibles. Se obtuvo una nueva resina biobasada con propiedades reversibles utilizando monómeros obtenidos de fuentes renovables, así como una formulación adhesiva de origen biológico. Las resinas epoxi de origen biológico desarrolladas, han sido validadas como adhesivos para la fabricación de *composites* textiles a base de fibras de aramida (Kevlar®). Los materiales preparados con estas resinas epoxi de origen biológico se aplicaron en *composites* utilizados en la fabricación de cascos de protección para proporcionar propiedades de alta resistencia a impactos y facilitar su reciclabilidad al final de su vida útil (EoL).

Palabras clave: Protección balística, *Composites* de aramida, Resinas reversibles, Resinas biobasadas, Reciclaje.

[1] Fundacion para el Desarrollo y la Innovación Tecnológica (FUNDITEC).

175 – Materiales compuestos autocurables con dualidad sensor-actuador para plataformas aéreas militares: un marco de transferencia tecnológica desde aerogeneradores a fuselajes de Defensa

Autores: Abenza, Eduardo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[2]

Resumen. Las plataformas aéreas militares (aeronaves de combate, UAV, HAPS y helicópteros) dependen de *composites* reforzados con fibra de carbono. En aeronaves de quinta generación (F-35, FCAS/NGWS), superan el 35 % de la masa estructural y el mantenimiento absorbe entre el 25 % y el 40 % del coste de ciclo de vida. Fatiga cíclica, impactos de baja energía (BVID), fragmentación balística y degradación ambiental obligan a inmovilizar la plataforma para reparaciones autoclave de horas a días, penalizando la disponibilidad operativa. Este trabajo propone un marco de aplicación de materiales compuestos autocurables inteligentes para plataformas aéreas de Defensa. La contribución original consta de tres ejes integrados. Primero, se formaliza un ciclo OODA material –por

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L. Disponible en: https://www.hi-iberia.es/artificial-intelligence.
[2] HI Iberia (inteligencia artificial).

analogía con el paradigma de Boyd– en el que redes percoladas de nanotubos de carbono (CNT) detectan microgrietas por piezorresistividad ($\Delta R/R_0 \geq 2$ %, resolución <5 mm) y activan el curado por calentamiento Joule sobre interláminas termoplásticas (PCL) o redes vitriméricas con química Diels-Alder (90-120 °C), alcanzando eficiencias de GIc superiores al 95 % en más de cien ciclos. Segundo, se propone una matriz de homologación de factores de escalado (fatiga 10^8-10^9 ciclos, humedad 60-95 %, ΔT -10/50 °C, modos de fallo) desde el entorno eólico *offshore* al aeronáutico certificable. Esta matriz articula un esquema *building-block* que parte del proyecto R3POWER (IEC 61400, validación en curso), atraviesa una estación intermedia en *radomes* aeronáuticos de fibra de cuarzo (proyecto AZISTA, estructuras secundarias de grado aeronáutico) y converge en fuselajes de UAV militares bajo STANAG 4671. Tercero, se presenta una hoja de ruta regulatoria orientada al panel NATO AVT para cerrar el vacío normativo existente en autocurado estructural. Como habilitadores se incorporan *Materials Informatics* con polyBERT ($R^2 > 0{,}85$ en veintiocho propiedades poliméricas), gemelo digital embebido con aprendizaje por refuerzo para la decisión de activación, y verificación poscurado mediante termografía y ultrasonidos con redes convolucionales. Se exploran aplicaciones de interés militar: *fight-through damage* en UAV MALE/HALE, blindajes *multi-hit*, tanques autosellantes y palas de rotor. Este trabajo no presenta resultados experimentales propios: la aplicación de modelos generativos tipo GNoME a autocurables permanece prospectiva y R3POWER está pendiente de publicación *peer-reviewed*. El trabajo se alinea con la línea ETID 3.2 Materiales y con la categoría 7 (*Novel Materials and Manufacturing*) del marco EDT de la OTAN. La ausencia de un STANAG específico para materiales autorreparables se plantea como oportunidad de contribución técnica al marco normativo OTAN.

Palabras clave: Materiales autocurables, *Composites* FRP estructurales, Plataformas aéreas no tripuladas, Dualidad sensor-actuador, Nanotubos de carbono, *Materials Informatics*, ETID 3.2 Materiales, Transferencia tecnológica eólica-aeronáutica.

186 – Optimización de la cadena de posprocesado en fabricación aditiva metálica: hacia la autonomía logística y la integridad estructural en operaciones de Defensa

Autores: Ochoa, Jaime[1]; Rodríguez, Jorge[2]; García-Blanco, Belén[2]; Santamaria, Pablo[2]; García Casas, Amaya[1]

Resumen. La fabricación aditiva metálica se ha posicionado como una tecnología disruptiva para las Fuerzas Armadas, permitiendo la producción de componentes críticos bajo demanda y en puntos de necesidad. No obstante, el despliegue real de esta capacidad enfrenta un desafío tecnológico crítico: la complejidad de los pasos que se realizan después de imprimir una pieza para mejorar sus propiedades, acabados o para garantizar que cumpla con los requisitos específicos del diseño. A pesar de que la impresión es ágil, las etapas de acabado son actualmente costosas, requieren infraestructuras voluminosas y dependen de productos químicos peligrosos o intervención manual cualificada, lo que limita el potencial de integración a gran escala de la fabricación aditiva en entornos operativos como plataformas terrestres, aéreas o navales. Desde la perspectiva de la ingeniería de materiales, la rugosidad superficial, los restos de soportes y

[1] CIDETEC, Basque Research, Technology Alliance (BRTA), 20014 Donostia-San Sebastián, Spain.

las tensiones residuales de las piezas impresas comprometen su integridad estructural. Sin tratamientos de superficie adecuados, las piezas presentan una vida útil reducida y una mayor susceptibilidad a la fatiga, corrosión y desgaste, suponiendo un riesgo para la seguridad operativa. Este aspecto es especialmente crítico en aleaciones de aluminio con alto contenido de silicio, muy extendidas en el sector por su ligereza y propiedades mecánicas, pero que presentan retos específicos en su acabado superficial debido a su microestructura. En este trabajo, se analiza la importancia de las propiedades superficiales en piezas de fabricación aditiva, demostrando cómo una reducción controlada de la rugosidad y la aplicación de tratamientos funcionales permiten una protección eficaz contra el desgaste y la corrosión. Finalmente, se presentan soluciones tecnológicas concretas que facilitan la operatividad militar: (1) el tratamiento de superficies internas en geometrías complejas, como intercambiadores de calor de alta eficiencia, donde los métodos mecánicos son inviables, y (2) la aplicación de tratamientos selectivos mediante tecnología de electrolito en gel (GELECTRODE). Esta última técnica permite actuar sobre zonas específicas de una pieza o realizar reparaciones *in situ* sin necesidad de desmontaje ni inmersión en grandes cubas. Estos avances resultan determinantes para dotar a los componentes de alta criticidad de las propiedades necesarias, reforzando la soberanía tecnológica y garantizando la capacidad de sostenimiento autónomo en escenarios operativos complejos.

Palabras clave: Fabricación aditiva metálica, Posprocesado, Ingeniería de superficies, Logística militar, Integridad de materiales, Tratamientos superficiales.

213 – Reducción de firma térmica en unidades militares: desarrollo de materiales de bajo coste para la mitigación de la detección infrarroja en escenarios de conflicto contemporáneo

Autores: Conte de Los Ríos, Augusto[1]; Esteban Paredes, Alfonso[2]; Madariaga Domínguez, Ernesto[3]

Resumen. La proliferación y democratización de sistemas de detección en el espectro infrarrojo constituye uno de los fenómenos más significativos en la transformación de los conflictos armados contemporáneos. La integración de cámaras térmicas en plataformas tripuladas y no tripuladas, constatada empíricamente en los conflictos de Ucrania e Irán, ha generado una nueva dimensión de vulnerabilidad para las unidades militares desplegadas en operaciones terrestres. Estos sistemas, caracterizados por su accesibilidad económica y escasos requisitos de adiestramiento, han erosionado de forma sustancial la efectividad de las técnicas convencionales de ocultación en el espectro visible, exponiendo al personal, vehículos y sistemas a procesos automatizados de adquisición de objetivos y ataques

[1] Armada española.
[2] Armada (Escuela de Submarinos),[3]Universidad de Cantabria (Escuela Técnica Superior de Náutica).

de precisión en condiciones diurnas y nocturnas. Desde una perspectiva física, la detección infrarroja opera sobre cuatro variables fundamentales: la emisión térmica intrínseca de materiales y superficies, los gradientes térmicos respecto al entorno circundante, la persistencia térmica derivada de los fenómenos de inercia y disipación calórica, y las condiciones ambientales (humedad relativa, velocidad del viento y temperatura). La interacción dinámica de estos factores limita gravemente la ocultación efectiva de las fuerzas propias, configurando la reducción de firma térmica como un imperativo estratégico y operativo de primer orden, más allá de una mera necesidad tecnológica. La presente investigación propone un enfoque experimental orientado a la anulación o mitigación de firmas térmicas mediante materiales de bajo coste y amplia disponibilidad en el mercado civil. A través de pruebas empíricas con fuentes de calor controladas y una evaluación sistemática de combinaciones materiales, se ha identificado como solución de mayor eficacia el empleo de polímeros termoplásticos transparentes (caracterizados por su resistencia mecánica y versatilidad) en combinación con pigmentos y sustancias aglutinantes de naturaleza orgánica y sintética. Este enfoque permite el desarrollo de soluciones técnicamente escalables y logísticamente viables para su implementación en unidades desplegadas. Los resultados proyectados presentan un impacto estratégico multidimensional: la preservación de la integridad de las fuerzas ante amenazas emergentes, el mantenimiento de la libertad de maniobra en entornos de alta vigilancia, la recuperación de la superioridad operativa nocturna y del factor sorpresa, así como el incremento de la capacidad disuasoria mediante la degradación de las capacidades de inteligencia y adquisición de objetivos adversarias. Este proyecto responde, en consecuencia, a uno de los desafíos más acuciantes de los escenarios bélicos del siglo XXI, aportando soluciones innovadoras, replicables y de alta aplicabilidad operativa para las Fuerzas Armadas.

Palabras clave: Firma térmica, Detección infrarroja, Camuflaje adaptativo, Polímeros termoplásticos, Supervivencia en combate.

235 – Diseño asistido por IA de composites reciclables y autorreparables para plataformas de defensa: vitrímeros y polímeros para fibra de vidrio

Autores: Abenza, Eduardo[1]; García Valcarce, David[1]

Resumen. Las plataformas aéreas y navales de defensa emplean de forma extensiva *composites* de matriz termoestable reforzados con fibra de vidrio, carbono o cuarzo, debido a su elevada relación resistencia-peso, estabilidad dimensional y prestaciones funcionales en entornos exigentes. Sin embargo, estos materiales presentan dos limitaciones críticas desde una perspectiva operativa y estratégica: su baja reciclabilidad al final de la vida útil y la dificultad de realizar reparaciones *in situ* en zona de operaciones. Esta situación incrementa la dependencia logística, dificulta el mantenimiento avanzado desplegado y limita la sostenibilidad del ciclo de vida de plataformas militares. El presente trabajo aborda estos retos mediante dos líneas complementarias desarrolladas en los proyectos R3Power y Azista, orientadas al diseño de nuevas matrices poliméricas avanzadas mediante inteligencia artificial. En primer lugar, se presenta VitrimerVAE, un *autoencoder* variacional generativo aplicado al descubrimiento de vitrímeros, una familia de polímeros con enlaces covalentes

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.

dinámicos que combina la resistencia mecánica y estabilidad térmica de los termoestables con la reprocesabilidad, reparabilidad y reciclabilidad asociadas a los termoplásticos. El modelo ha explorado un espacio combinatorio de cincuenta mil ácidos y cincuenta mil epóxidos, generando 8424 formulaciones candidatas de vitrímeros. Sus propiedades clave, incluyendo temperatura de transición vítrea y módulo elástico, se han estimado mediante dinámica molecular acelerada con potenciales interatómicos aprendidos, como MACE y NequIP, logrando tiempos de cálculo hasta cincuenta veces inferiores a los de aproximaciones basadas en ReaxFF. Las mejores formulaciones identificadas alcanzan aproximadamente un 50 % de contenido biobasado, reforzando su interés para estrategias de sostenibilidad y autonomía material. En segundo lugar, se presenta la optimización mediante IA de polímeros para *composites* reforzados con fibra de vidrio destinados a *radomes* militares. En este caso, se emplean modelos polyBERT, con un error RMSE de 11,92 °C en la predicción de Tg, y PolyTAO para diseño inverso de formulaciones que satisfagan requisitos extremos de transparencia electromagnética, incluyendo constante dieléctrica $\varepsilon'=3{,}0–3{,}5$ a 6 GHz y tangente de pérdidas tan $\delta=0{,}0002$. Finalmente, se discute la aplicabilidad directa de estas tecnologías en reparación de campo de estructuras dañadas, fabricación de componentes reparables y reciclables, reducción de la huella logística y extensión sostenible del ciclo de vida de plataformas militares aéreas y navales.

Palabras clave: Vitrímeros, *Composites* reciclables, Fibra de vidrio, *Radomes*, Inteligencia artificial, Plataformas aéreas, Reparación *in situ*.

242 – Fabricación utilizando técnicas híbridas LPBF + LW DED

Autores: Torres Fernández, Raúl[1]; Racero Catalan, Javier[2]; Sivo Romero, José[3]; Lasagni, Fernando[3]; González, Francisco Javier[2]

Resumen. La consolidación de la fabricación aditiva en el sector industrial ha dejado de ser una mera alternativa productiva para convertirse en un pilar estratégico dentro del ámbito de la defensa, donde su implementación es fundamental para garantizar la soberanía sobre la propiedad intelectual de los componentes críticos. En este contexto, la convergencia de las tecnologías de fusión en lecho de polvo (PBF) y la deposición por energía directa (DED) ofrece una solución integral a los desafíos técnicos de la Armada española. Mientras que la tecnología PBF permite la creación de geometrías de alta complejidad y estructuras optimizadas para la reducción de peso que resultan inalcanzables mediante métodos sustractivos convencionales, la tecnología DED aporta una versatilidad esencial para la reparación y el mantenimiento de grandes componentes, tales como ejes, hélices y válvulas, permitiendo la adición de material sobre piezas ya existentes con una elevada tasa de deposición. La adopción de un modelo de fabricación aditiva híbrida, que combine la precisión

[1] Armada española.
[2] Novaindef.
[3] Novaindef (CEDAEC Linares).

geométrica de la PBF con la capacidad de reparación y escala de la DED, representa un salto cualitativo en la capacidad operativa de las fuerzas navales. Esta sinergia no solo permite el estudio y la validación de probetas técnicas, sino que facilita la producción de piezas funcionales que responden a las exigencias del entorno marítimo. Desde una perspectiva estratégica, este avance permite transformar las bases navales en centros de producción autónomos, lo que reduce drásticamente la dependencia logística externa y optimiza los tiempos de respuesta ante averías o necesidades de mantenimiento. En última instancia, el empleo de estas tecnologías híbridas posiciona a la industria naval española en la vanguardia tecnológica de la OTAN, fomentando una interoperabilidad más eficaz y garantizando que las unidades de la flota mantengan una mayor permanencia en sus áreas de operaciones. Al sustituir el concepto tradicional de reparación por el de «fabricación ágil», la Armada española asegura su autonomía estratégica y una gestión más eficiente del ciclo de vida de sus plataformas, consolidando un ecosistema industrial resiliente frente a la obsolescencia y los retos geopolíticos actuales. Este enfoque no solo optimiza los recursos disponibles, sino que establece un nuevo estándar de sostenibilidad y eficiencia en la gestión del material de defensa.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Defensa, Soberanía industrial, Propiedad intelectual, Componentes críticos, Fusión en lecho de polvo (PBF), Deposición por energía directa (DED), Fabricación híbrida, Armada española, Geometrías complejas, Optimización estructural, Reducción de peso, Reparación de componentes, Mantenimiento naval, Grandes componentes, Ejes navales, Hélices, Válvulas, Alta tasa de deposición, Producción autónoma, Bases navales, Centros de producción, Logística reducida, Autonomía operativa, Capacidad de respuesta, Validación de probetas, Piezas funcionales, Entorno marítimo, Industria naval española, OTAN, Interoperabilidad, Disponibilidad operativa, Fabricación ágil, Ciclo de vida, Resiliencia industrial, Obsolescencia, Sostenibilidad, Eficiencia operativa.

3.3
Energía

30 – Del soldado al sistema no tripulado: evolución del almacenamiento energético basado en aluminio-aire

Autores: Almodovar, Paloma[1]; Santos, Lara[1]; Chacón, Joaquín[1]

Resumen. Las necesidades energéticas en defensa han experimentado una transformación profunda en la última década, impulsada por la creciente demanda de movilidad, autonomía y reducción de la carga logística en escenarios operativos cada vez más exigentes. En este contexto, las tecnologías electroquímicas basadas en aluminio han emergido como una familia de especial interés por su potencial para ofrecer soluciones seguras, ligeras, sostenibles y estratégicamente atractivas. Este trabajo revisa la evolución de dichas tecnologías en aplicaciones de defensa, tomando como punto de partida el caso de las baterías aluminio-aire orientadas al combatiente y proyectando su desarrollo hacia sistemas aéreos no tripulados. Como antecedente relevante, se analiza el proyecto ALPAM, impulsado en el marco del programa COINCIDENTE 2018 del Ministerio de Defensa, concebido como un dispositivo portátil primario de almacenamiento de electricidad de bajo peso basado en tecnología aluminio-aire. Su objetivo principal fue cubrir necesidades de portabilidad energética en

[1] Zelestium Technologies.

aplicaciones civiles y militares, con un beneficio operativo claro: reducir de forma significativa la carga logística del combatiente y mejorar su movilidad y confort. Este caso ilustra cómo una química con elevada densidad energética teórica y elevada disponibilidad de materia prima podía responder a requisitos reales del entorno militar. A partir de este punto, el trabajo discute cómo los criterios que justificaron inicialmente el interés por el aluminio-aire, ligereza, autonomía, seguridad, disponibilidad del material y menor dependencia estratégica de materias primas críticas, siguen siendo plenamente vigentes en el ámbito actual de los drones de defensa. En particular, se expone la transición conceptual desde sistemas energéticos portátiles para el soldado hacia nuevas arquitecturas energéticas para UAS, donde las baterías basadas en aluminio se contemplan como una vía prometedora para incrementar la autonomía de misión, reducir riesgos asociados a otras químicas y facilitar diseños más eficientes e integrados. Finalmente, se plantea que la evolución desde aluminio-aire hacia nuevas generaciones de baterías de aluminio para plataformas no tripuladas no constituye una ruptura, sino una continuidad tecnológica con alto valor dual. Esta trayectoria confirma que el aluminio puede desempeñar un papel relevante en la próxima generación de soluciones energéticas para defensa, tanto en sistemas individuales como en plataformas aéreas avanzadas.

Palabras clave: Baterías metal-aire, Aluminio-aire, Sistemas energéticos para defensa, Vehículos aéreos no tripulados, Densidad energética, Logística operativa.

47 – Producción de combustibles estratégicos para las Fuerzas Armadas a partir de NFU: un modelo para la resiliencia energética y la defensa nacional

Autores: Jiménez Regén, Esteban José[1]; Bastante Flores, Francisco Javier[1]; Dorado, María del Pilar[2]; Carmona, Miguel[2]; Fernández Arteaga, Alejandro[3]; Cantero Obregón, Antonio[4]; Bautista Ruíz-Yherla, Juan[4]

Resumen. La gestión de residuos en el ámbito militar representa un desafío estratégico que va más allá del cumplimiento normativo y ambiental. Los neumáticos fuera de uso (NFU) provenientes de vehículos militares, debido a sus características específicas como mayor resistencia estructural y tamaño, constituyen una materia prima clave para abordar problemas asociados con la sostenibilidad operativa y la autonomía energética de las Fuerzas Armadas. En un escenario global marcado por la inestabilidad geopolítica, la competencia por recursos energéticos y la transición hacia una economía circular, su valorización adquiere una dimensión táctica relevante. Este trabajo presenta una propuesta técnica para la producción

[1] Ejército de Tierra.
[2] Universidad de Córdoba.
[3] Universidad de Granada.
[4] Escuela Politécnica Superior del Ejército.

de combustibles estratégicos F-34 (JP8), F-54 (gasoil militar) y F-76 (combustible naval), a partir de NFU generados en el entorno militar. La capacidad de producir combustibles para aviación, vehículos terrestres y embarcaciones militares directamente a partir de estos residuos no solo reduce la dependencia de fuentes externas, sino que también refuerza la resiliencia logística en escenarios de conflicto bélico donde el acceso al suministro energético pueda estar comprometido. El enfoque se ha basado en la caracterización fisicoquímica del residuo, identificando el contenido en carbono, hidrógeno, azufre y compuestos aromáticos, así como su comportamiento térmico, y estableciendo las bases para su potencial uso como materia prima en procesos de pirólisis térmica. A partir de esta caracterización, se ha desarrollado un modelo de planta compacta y modular, diseñada para operar en bases militares. El estudio incluye una estimación de rendimiento energético con una proyección de producción de hasta 142 500 litros anuales de combustible líquido por unidad. Asimismo, se ha considerado la viabilidad logística, la adecuación del producto mediante procesos de hidrotratamiento, y la compatibilidad con las especificaciones de combustibles militares existentes. Su implementación podría posicionar a las Fuerzas Armadas como agente activo en la transición energética nacional, estableciendo un vínculo directo entre la sostenibilidad operativa y las necesidades estratégicas de defensa del siglo XXI.

Palabras clave: Autonomía energética, Economía circular, NFU militares, Pirólisis.

59 – Nanotecnología: un pilar estratégico para la autonomía energética y la geopolítica de los metales críticos

Autores: Martínez, Gema[1]; Segura, Germán[1]; Ugarte, Ignacio[1]; Traver, Vicente[2]; Mur, Joaquín[1]; Hueso, José Luis[3]; Balas, Francisco[3]

Resumen. Atrás quedó la hegemonía de las potencias que ejercían su influencia únicamente mediante su poder político y militar. El sistema energético mundial es el nuevo escenario de confrontación. La transición energética exigirá un aumento considerable del suministro de materiales críticos, ya que metales como el platino, el oro o el litio son el corazón de las tecnologías de energías renovables y de otros avances tecnológicos. En un momento en el que la hegemonía mundial está en juego, la excesiva concentración de metales en determinados países como China o Rusia añade complejidad al mercado, y podría ser utilizado como herramienta geopolítica con graves implicaciones para la seguridad internacional. En consecuencia, las potencias actuales y emergentes reconocen que el dominio tecnológico –específicamente en el desarrollo de materiales alternativos que mitiguen la dependencia de metales críticos– es un factor decisivo para asegurar la autonomía estratégica y proyectar poder global.

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Ctra. de Huesca s/n.
[2] Brigada Aragón I, Regimiento Pavía 4, Zaragoza.
[3] Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (CSIC-Universidad de Zaragoza).

Es en este contexto donde la nanotecnología, considerada la revolución tecnológica del siglo XXI, emerge como una herramienta estratégica fundamental. Su potencial ha impulsado inversiones masivas por parte de Estados Unidos, Japón y la Unión Europea. Un ejemplo tangible es el diseño de nanomateriales avanzados y su uso como catalizadores en tecnologías de energías renovables, capaces de reducir la necesidad de metales críticos hasta en un 85 % sin sacrificar el rendimiento respecto a las tecnologías comerciales basadas en metales preciosos, disminuyendo así vulnerabilidades estratégicas clave. En este trabajo, se presenta una nueva generación de materiales nanoestructurados: catalizadores de átomo único (SAC, *Single Atom Catalysts*) basados en metales de transición abundantes y no críticos (M= Fe, Co), y desarrollados mediante una novedosa tecnología láser. Este método de síntesis, potencialmente escalable, genera SAC en un solo paso que contienen sitios activos de naturaleza M-N-C y exhiben alta actividad catalítica en la reacción de reducción de oxígeno (ORR), un proceso electroquímico crucial para el avance de las celdas de combustible, tecnologías clave en la transición energética y la electrificación de la economía.

Palabras clave: Transición energética, Materias primas críticas (MPC), Catalizadores de átomo único (SAC), Materiales nanoestructurados, Reacción de reducción de oxígeno (RRO).

84 – Del concepto al demostrador tecnológico: hacia un almacenamiento energético inteligente para la defensa europea (NOMAD)

Autora: Rengel Gálvez, Rosa María[1]

Resumen. El proyecto NOvel energy storage technologies usable at MilitAry Deployments in forward operating bases (NOMAD), financiado por la DG DEFIS en el marco del European Defence Fund 2021, aborda un desafío crítico para la defensa europea: garantizar un suministro energético seguro, resiliente y sostenible en bases avanzadas de operaciones (FOB). En un contexto de creciente necesidad de autonomía estratégica, NOMAD impulsa tecnologías clave para reducir la dependencia energética y reforzar la competitividad industrial europea. El enfoque del proyecto integra arquitecturas energéticas híbridas, soluciones avanzadas de almacenamiento y sistemas inteligentes de gestión energética (EMS), diseñados para operar en condiciones exigentes y con elevados requisitos de fiabilidad. Todas las arquitecturas, interfaces e interconexiones han sido validadas conforme a los indicadores claves de rendimiento definidos, incorporando criterios de estandarización e interoperabilidad que consolidan un marco robusto para la evolución hacia sistemas energéticos

[1] INTA, National Institute for Aerospace Technology.

de nueva generación. Actualmente, NOMAD se encuentra en una fase avanzada de desarrollo, evaluación y reducción de riesgos de tecnologías con distintos niveles de madurez. Se han desarrollado tres demostradores modulares en contenedores de veinte pies, cuya evaluación comenzará en julio de 2026 en instalaciones de ensayo en Alemania, Noruega y España, permitiendo validar las soluciones en condiciones operativas reales. ARPA, coordinador del proyecto, lidera la integración del demostrador que se evaluará en el Laboratorio de Energía del INTA en El Arenosillo (Huelva). Este entorno de validación permite analizar rendimiento, eficiencia, resiliencia del sistema en condiciones operativas, y aspectos logísticos como despliegue, conexión y operación conjunta con sistemas de generación de energía eléctrica habituales en misiones de las FAS, etc. Un elemento clave en esta operación y validación es el EMS desarrollado por THALES España, permitiendo optimizar el uso de los recursos energéticos disponibles mediante la integración de diferentes tecnologías de almacenamiento y conversión, asegurando operatividad, fiabilidad y autonomía. Asimismo, NOMAD incorpora un enfoque integral de sostenibilidad mediante análisis de ciclo de vida (LCA) y de costes (LCC). La participación de IMDEA es especialmente relevante en la evaluación ambiental, contribuyendo a cuantificar impactos y definiendo estrategias para reducir consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) en configuraciones donde los demostradores operan conjuntamente con grupos generadores basados en combustibles fósiles. En conjunto, NOMAD representa un avance significativo hacia sistemas energéticos desplegables más eficientes, inteligentes y sostenibles, con alto potencial de aplicación dual, posicionando a Europa en la vanguardia de las tecnologías de almacenamiento y gestión energética para defensa.

Palabras clave: Almacenamiento energético avanzado, Bases avanzadas de operación (FOB), Gestión inteligente (EMS).

134 – Centro de gestión de energía móvil, multifuente y con capacidad integrada de vigilancia

Autores: Santos Martín, David[1]; Nicolás Martín, Carolina[1]; González García, Jorge[1]; Sánchez Arriaga, Gonzalo[1]

Resumen. El suministro eléctrico a bases avanzadas, campamentos temporales y puestos de mando desplegados condiciona la autonomía operativa y la firma logística de las unidades en zona. Las soluciones actuales, grupos electrógenos diésel y más recientemente contenedores fotovoltaicos híbridos con respaldo diésel, dejan sin resolver la integración bidireccional de múltiples fuentes renovables, el almacenamiento energético y la generación autónoma de red local estable ante cargas sensibles y de potencia. Este trabajo presenta un prototipo de plataforma terrestre móvil de 20 kVA desarrollada conjuntamente por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) y CT Ingenieros. Configurado como microrred móvil, el sistema integra sobre una infraestructura común cuatro capacidades operativas: (1) centro de gestión de energía multifuente y multicarga; (2) generación de energía renovable mediante el primer prototipo nacional de un sistema de energía eólica aerotransportada (AWES) que integra una aeronave ligera unida al centro de gestión mediante un cable;

[1] Universidad Carlos III de Madrid.

(3) generación de red eléctrica local autónoma y (4) habilitación de cargas aerotransportadas ancladas a la aeronave del AWES, con carga útil superior y mayor persistencia que los UAS de similar clase. El centro de gestión energético opera bidireccionalmente: admite como potenciales fuentes sistemas de eólica convencional, AWES, fotovoltaica, grupo electrógeno diésel y conexión a red, y suministra cargas trifásicas y monofásicas en alterna y en continua, con capacidad de expansión a otros vectores energéticos. El sistema AWES del prototipo opera a mayor altura (100-400) que un sistema eólico convencional, accediendo así a vientos más constantes y menos intermitentes y con una infraestructura drásticamente menor. En ubicaciones sin red eléctrica, la plataforma forma una red local autónoma y estable (*grid forming*) capaz de alimentar de manera simultánea cargas sensibles y equipos de potencia; si existe red externa disponible, puede acoplarse a ella para intercambio bidireccional o respaldo. La aeronave del AWES puede operar en dos modos alternativos sobre la misma infraestructura: generación eléctrica en ciclo de bombeo, o anclaje aéreo estable para cargas útiles (ISR, radioenlaces elevados, sensores atmosféricos). Este doble uso elimina las compensaciones entre autonomía y carga útil características de los UAS convencionales. La madurez tecnológica es diferenciada por subsistema: centro de gestión energético TRL 6, generación AWES TRL 5, generación de red local y habilitación de cargas aéreas TRL 2-3. Esta línea de desarrollo se alinea con la actividad OTAN en AWES para defensa: colaboraciones con el Ministerio de Defensa de los Países Bajos, el programa NATO DIANA y plataformas ISR duales en Noruega. El trabajo contempla además la integración futura de la plataforma sobre vehículo terrestre no tripulado (UGV) como evolución propia del concepto.

Palabras clave: Concentrador energético, Microrred móvil, AWES, Bases avanzadas, Plataforma desplegable, ISR, Generación de red local.

159 – PULSMES: desarrollo de un sistema pulsado de alta potencia basado en SMES

Autores: Sarmiento, Gustavo[1]; Sanz, Santiago[1]; Cano, Eduardo[2]; Arca, Eduardo[2]; Torrelo, Alfonso[2]; Eiriz, Ignacio M.[3]; López, Ion[3]; Milla, Javier[4]; López, Alexander[1]; García, Sonia[1]; Bastarrarena, Joseba[1]; Amo, Unai del[1]; Sáez de Ocariz, Idurre[3]

Resumen. Los recientes conflictos armados han constatado la importancia de las armas de energía dirigidas, principalmente dentro de un contexto de contención y eliminación de potenciales amenazas de sistemas no tripulados en formación aislada o en enjambre. En el caso de una plataforma naval o aérea, la incorporación de esta tipología de armamento presenta un importante impacto en el sistema energético, lo que obliga a un dimensionamiento eficiente dentro de una estructura de red aislada. El proyecto PULSMES ofrece un enfoque consistente con la problemática reseñada, ya que combina un SMES (*Superconducting Magnet Energy Store*), junto con otra tipología de sistemas de almacenamiento como baterías o ultracondensadores. Centrado en aportar seguridad y flexibilidad en la demanda dentro de una red aislada, la solución dispone de

[1] SUPRASYS.
[2] Edair Technologies.
[3] Centro de Tecnologías Aeronáuticas.
[4] None.

un sistema de gestión energética que permite un flujo energético bidireccional. Tras superar distintos estadios de diseño conceptual y de detalle, PULSMES se encuentra en estos momentos en fase de desarrollo experimental y ensayo, con el objetivo de disponer de un sistema demostrador en grado de madurez TRL4. Consiste por lo tanto en un SMES de escala reducida diseñado para demostrar un almacenamiento de 18 kJ, con capacidad de entrega de corriente de 200 A. Se pretenden constatar unas densidades energéticas en torno a 40 kJ/m3 así como pulsos de descarga de 10 ms. El SMES está conectado a un bus común de corriente continua de tensión máxima de1500 V, combinado con sistemas de baterías de hasta 250 kW en potencia y 500 kWh de almacenamiento, y ultracondensadores, de hasta 200 kW en potencia y 5 kWh de almacenamiento. Esta hibridación energética garantiza una operación prolongada y presenta la capacidad de ajustarse a multitud de perfiles de demanda, mayormente pulsados. El sistema de gestión energética, basado en la integración de electrónica de potencia específica y algoritmos de optimización del flujo de energía, permitirá una descarga controlada y la adaptación del pulso a cada perfil de carga. De este modo, se optimizarán los puntos de operación de los distintos equipos, garantizando condiciones de funcionamiento adecuadas. Asimismo, se logrará una gestión optimizada de la carga de los sistemas de almacenamiento, acorde con las características de la planta de generación embarcada. En esta contribución, se mostrarán los desarrollos experimentales, así como los resultados obtenidos en los ensayos y pruebas de validación llevados a cabo.

Palabras clave: Almacenamiento energético, SMES, Armas de energía dirigida, Láser, Superconductividad.

180 – Aplicación de la inteligencia artificial en la gestión de energía

Autores: López, Javier[1]; Monasterio, Leticia[1]; Forteza Esteban, Juan José[1]

Resumen. En el ámbito de la defensa, los sistemas de gestión de energía (EMS, *Energy Management Systems*) desempeñan un papel esencial en la supervisión y coordinación de arquitecturas energéticas compuestas por módulos heterogéneos, como baterías, convertidores, cargas, sistemas de climatización y electrónica de potencia. La complejidad de estos entornos, unida al impacto operativo de posibles fallos, hace especialmente relevante la incorporación de capacidades avanzadas de monitorización que permitan detectar de forma anticipada comportamientos anómalos en los elementos energéticos y facilitar una respuesta temprana del operador ante situaciones potencialmente críticas. En este contexto, la presente contribución se desarrolla en el marco del proyecto NOvel energy storage technologies usable at MilitAry Deployments in forward operating bases (NOMAD), financiado por la DG DEFIS en el marco del European Defence Fund 2021. El proyecto tiene como objetivo la creación de sistemas energéticos, móviles e inteligentes capaces de garantizar un suministro de energía en bases militares desplegadas, donde los sistemas de gestión de energía desempeñan un papel clave para asegurar

[1] Thales España Sistemas.

un suministro energético seguro. En este marco, se propone la integración de un agente de inteligencia artificial en un EMS para la predicción temprana de anomalías a partir del análisis multivariante de variables operativas, tales como corriente, tensión, potencia, temperatura, ciclos de carga y descarga, o consumo por módulo. La solución se basa en el empleo de redes neuronales de tipo autoencoders junto con redes neuronales recurrentes, concretamente arquitecturas LSTM (*Long Short-Term Memory*). En lo que respecta a la arquitectura de LSTM, esta es utilizada por su capacidad para modelar series temporales y capturar dependencias a largo plazo de secuencias de datos. Por su parte, el uso de *autoencoders* tiene la finalidad de evaluar desviaciones mediante el error de reconstrucción. Esta combinación permite la identificación temprana de posibles situaciones anómalas en el comportamiento nominal de los elementos de energía. El agente se integra en la arquitectura *software* del EMS preservando la modularidad y la interoperabilidad del sistema. Desde el punto de vista operativo, la propuesta adopta un enfoque *human-in-the-loop*, en el que la inteligencia artificial actúa exclusivamente como sistema de apoyo a la decisión. En aquellos módulos que disponen de parada de emergencia, la predicción temprana permite generar alertas ante posibles anomalías, manteniendo en todo momento al operador como responsable último de valorar la activación de una eventual parada del sistema. La propuesta pone de manifiesto el potencial de la inteligencia artificial para reforzar la supervisión avanzada de sistemas energéticos en entornos de defensa, mejorando la resiliencia operativa y el conocimiento situacional del operador.

Palabras clave: Sistema de gestión de energía (EMS), Inteligencia artificial (IA), Anomalías.

233 – Recuperación de energía termoeléctrica integrada en textiles inteligentes para la monitorización de salud del combatiente

Autores: Abenza, Eduardo[1]; García Valcarce, David[1]

Resumen. La monitorización continua de signos vitales del combatiente en operaciones de campo constituye una necesidad creciente para mejorar la conciencia situacional, la prevención de bajas y la respuesta médica temprana en entornos tácticos. Sin embargo, la incorporación de sensores biomédicos en el equipamiento individual plantea un reto crítico: disponer de una fuente de alimentación ligera, silenciosa, autónoma y compatible con operaciones prolongadas, evitando la dependencia del reemplazo frecuente de baterías y reduciendo la carga logística del soldado. En este contexto, el presente trabajo propone un estudio conceptual para el diseño de módulos termoeléctricos flexibles, integrables en textiles inteligentes del equipamiento militar, capaces de recuperar energía a partir del gradiente térmico existente entre la piel del combatiente, próxima a 37 °C, y el ambiente exterior, dentro de un rango operacional estimado entre -10 °C y 45 °C. La propuesta se basa en materiales termoeléctricos desarrollados en el proyecto CHAINERGY como alternativa al Bi_2Te_3 convencional,

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.

priorizando siliciuros de bajo coste, menor criticidad material y mayor alineación con cadenas de suministro europeas. El diseño considerado combina aleaciones $Mg_2Si_{2-x}Sn_x$ como material tipo n y $MnSi_{1.73}$ como material tipo p, optimizadas mediante modelos predictivos de inteligencia artificial con el objetivo de alcanzar valores $ZT \geq 1$ en el rango de temperatura 300-350 K. A partir de esta base, se analiza la generación de potencia esperada en un chaleco táctico instrumentado, considerando gradientes térmicos moderados de 5-15 K, y se evalúa su suficiencia para alimentar sensores biomédicos de baja potencia, incluyendo pulsómetro, acelerómetro, termómetro corporal y módulo BLE para comunicaciones de corto alcance. La propuesta prioriza materiales de suministro nacional o europeo, como silicio, manganeso y magnesio, con un coste objetivo inferior a 30 €/kg, frente a los 300-600 €/kg asociados al Bi_2Te_3. Esta aproximación contribuye a la autonomía estratégica material, reduce la dependencia de materias primas críticas y facilita el despliegue de sistemas energéticamente autosuficientes en escenarios militares. Pr último, se discute la integración de estos módulos con redes de sensores corporales, arquitecturas Body Area Network y soluciones de sanidad militar conectada, alineándose directamente con los focos DESEi+d 2026 en textiles inteligentes, sanidad militar y sostenibilidad energética en operaciones desplegadas.

Palabras clave: Textiles inteligentes, Termoeléctricos, *Energy harvesting*, Salud del combatiente, *Body Area Network*, Siliciuros, Tecnología dual.

246 – Baterías de flujo: almacenamiento energético para campamentos militares

Autores: Flox, Cristina[1]; Pérez, Juan M.[1]

Resumen. El objetivo principal de la ponencia es mostrar la integración de baterías de flujo (BF) como una solución versátil, adaptable y resiliente en el ámbito de la defensa. La tecnología destaca por ser aplicable a escenarios exigentes, ambientes hostiles y despliegues logísticos complejos tanto en campamentos militares como en soluciones móviles de abastecimiento energético. La solución propuesta puede ser ejecutada como una solución tradicional estacionaria o para cubrir necesidades móviles de abastecimiento de energía. Las operaciones militares modernas requieren soluciones energéticas fiables, seguras y escalables que respondan a entornos cada vez más exigentes y variables. Específicamente, garantizar la continuidad de suministro de energía eléctrica, así como la independencia de los generadores diésel son una prioridad para las aplicaciones militares. En este contexto, las BF suponen una prometedora solución al ofrecer ventajas únicas y diferenciadoras frente a otras tecnologías convencionales. En particular, las BF se caracterizan por una mayor seguridad sin riesgos de explosión y estabilidad térmica lo que proporciona un nivel superior de seguridad operativa. Además, presentan una vida

[1] Iberian Centre for Research in Energy Storage.

prolongada, capaces de proporcionar larga duración de almacenamiento y estabilidad en el ciclado, lo que se traduce en una menor necesidad de mantenimiento y recambio optimizando los recursos en entornos exigentes. Además, es totalmente adaptable a la forma de generación de energía que haya disponible. Bajo la perspectiva de su estructura, las disoluciones de electrolito se separan físicamente de la celda electroquímica y se almacenan en tanques externos e impulsados de forma continua por todo el sistema. Esta arquitectura de flujo permite desacoplar la potencia de la energía, facilitando su diseño acorde con la aplicación y otorgando modularidad, versatilidad y flexibilidad. La posibilidad de reemplazo de electrolito en campo abre la puerta a nuevos esquemas de movilidad energética en escenarios tácticos. Las BF tienen una gran variedad de soluciones (vanadio, hierro, etc.) que cubren amplios rangos de trabajo. Se presenta una solución por completo móvil, perfectamente adaptable a las necesidades de un campamento militar con una versatilidad total para cubrir las demandas energéticas. Este sistema móvil de BF se basa en la tecnología de Zn-I- (zinc-yoduro) que es sostenible medioambiental y económicamente más rentable que las BF comerciales. Se realizará un profundo análisis de la solución planteada en comparación con las tecnologías existentes y se mostrará la versatilidad en hibridación de varias tecnologías para adaptarse a situaciones excepcionales.

Palabras clave: Baterías de flujo, Almacenamiento de energía, Camión energético, Baterías.

259 – Producción de combustible sintético a partir de residuos de hidrocarburos de buques de la Armada

Autores: Gallardo Delgado, Pablo[1]; Rojas Muñoz, Sergio[2]; González Gil, Lorena[3]

Resumen. La disponibilidad de combustible es vital para garantizar la libertad de acción de la Armada, pues sus buques se propulsan gracias al diésel y sus aeronaves vuelan con queroseno. En un contexto geopolítico cambiante, la contracción en la oferta de crudo y el aumento del precio de sus derivados suponen una amenaza directa a la operatividad del conjunto de las Fuerzas Armadas, tornándose en indispensable la necesidad de explorar vías alternativas —y sostenibles— de obtención de combustible. La síntesis de Fischer-Tropsch (FT) es una reacción de polimerización exotérmica que transforma syngas —CO y H_2— en cadenas de hidrocarburos lineales. El crecimiento de dichas cadenas está gobernado por la distribución Anderson-Schulz-Flory y depende de condiciones de operación tales como: el catalizador, la temperatura, la presión, la ratio H_2/CO, etcétera. La capacidad de obtención de syngas a partir de un recurso rico en carbono es clave y, aunque tradicionalmente se emplean carbón y

[1] Armada española, Ministerio de Defensa.
[2] Grupo de Energía y Química Sostenibles, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC.
[3] Grupo de Ingeniería Térmica y Ambiental, Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar de Marín.

metano, nuevas líneas de investigación persiguen producir hidrocarburos sostenibles, como el Sustainable Aviation Fuel, mediante FT, a partir de: captura de CO_2 atmosférico, biomasa, biogás, residuos agrícolas e industriales, algas, entre otros. El objeto del trabajo es estudiar la viabilidad de obtener diésel parafínico sintético (SPD), a partir de los residuos de hidrocarburos —aceites lubricantes sucios y aguas oleosas de sentina— generados a bordo de los buques de la Armada; para ser empleado junto con el combustible naval F-76, de acuerdo con los estándares de calidad de la OTAN En primer lugar, se ha estimado la generación anual de residuos y se ha llevado a cabo la caracterización de muestras representativas de los mismos. En segundo lugar, se ha diseñado y ejecutado una simulación del proceso FT ajustado a las necesidades de la Armada. Los resultados indican que se generan en torno a setecientas treinta toneladas de residuos de hidrocarburos, con unas características, especialmente en términos de relación C/H y contenido de metales, apropiadas para su gasificación y posterior transformación en SPD. Bajo las condiciones simuladas, se obtendrían setecientos veinte mil litros —quinientas sesenta toneladas— anuales de SPD. Comparando con plantas similares, del tipo *Micro-Gas-to-Liquid*, el proceso podría amortizarse a corto plazo. Su implementación redundaría positivamente en la eficiencia de la Armada, y la implementación a nivel Fuerzas Armadas de esta tecnología contribuiría a la autonomía estratégica de España.

Palabras clave: Buques, Diésel parafínico sintético, Gasificación, Síntesis de Fischer-Tropsch, Residuos de hidrocarburos.

3.4
Logística

36 – Hacia una Europa de la defensa: integración y trabajo en equipo entre operadores logísticos civiles y Fuerzas Armadas a través de una red federada de información logística *(fedlogit network)*

Autores: Muñoz Romero, María; Barriuso Camarero, Javier; Rodríguez Sánchez, Raúl; Melero Crespo, Carmen; Aparicio Ortega, Luis Miguel [1]

Resumen. Actualmente, se está planteando la posibilidad de comunicación directa para compartir información logística entre Fuerzas Armadas de la Unión Europea (UE) incluyendo a sus operadores logísticos comerciales (CLO), más allá de aplicaciones propias de la OTAN y permitiendo que sus sistemas de información logística se comuniquen entre sí. Para ello, ya existe un concepto de red federada para la comunicación entre sistemas logísticos militares y civiles (FedLogIT Network), pero se requiere profundizar en cómo y qué tipo de información logística intercambian los CLO, recopilar su visión actual y futura, así como descubrir las potenciales oportunidades y desafíos logísticos observados por los CLO en el ámbito de la defensa. Se han investigado los servicios que prestan los CLO respecto de sus clientes militares y civiles, las capacidades de que

[1] Todos los autores ocupan su cargo en ISDEFE.

disponen y cómo intercambian la información logística (métodos, protocolos y normas), a partir de encuestas y entrevistas estructuradas realizadas a CLO que operan tanto con las Fuerzas Armadas de los Estados miembros de la UE como con clientes civiles.

Asimismo, se han considerado aspectos de interoperabilidad y ciberseguridad alineados con las políticas que recomienda la EDA en estos ámbitos. Basado en dichos hallazgos, se han caracterizado los servicios y procesos logísticos que prestan, así como los intercambios de información logística más comúnmente proporcionados por los CLO, tanto en el ámbito civil como en el de defensa. Adicionalmente, se han identificado diferencias sustanciales en las operaciones de intercambio de información logística de los CLO con sus clientes civiles o del ámbito de la defensa, tanto en la madurez de las tecnologías empleadas como en los volúmenes de intercambio de información.

Como resultado, se han elaborado unas conclusiones que permiten orientar la implementación del FedLogIT Network y garantizar una plena alineación con la realidad operativa tanto de los actores logísticos militares como civiles. Este proyecto ha sido liderado por la European Defence Agency (EDA) en colaboración con Ingeniería de Sistemas para la Defensa (Isdefe) dentro del marco de mejoras logísticas en apoyo a los despliegues militares liderados por la UE.

Palabras clave: Logística, Sistemas de Información, Operador logístico civil, Red federada, Comunicaciones, Interoperabilidad, Defensa.

63 – Un modelo de optimización para la planificación de operación y mantenimiento de una flota de aeronaves

Autores: Skorin-Kapov, Nina[1]; Vilela Martín, Alejandro[2]

Resumen. La planificación integrada de mantenimiento y operaciones de vuelo en flotas aeronáuticas constituye un problema logístico de alta complejidad, caracterizado por una gran cantidad de decisiones discretas y variables continuas, así como por la presencia de múltiples restricciones operativas críticas. En entornos militares, donde la disponibilidad de las aeronaves y la seguridad operativa son factores determinantes, resulta imprescindible disponer de herramientas capaces de optimizar la asignación de recursos de forma rigurosa y eficiente. En este trabajo, se aborda el problema de planificación conjunta de vuelos y mantenimientos (MFMP) para una flota de aeronaves Pilatus PC-21 perteneciente al 792 Escuadrón del Ejército del Aire y del Espacio. Para ello, se propone un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (*Mixed Integer Linear Programming*, MILP), integrando decisiones binarias asociadas a la asignación de aeronaves a misiones junto con variables continuas relacionadas con tiempos de vuelo, costes operativos y consumo. El modelo

[1] Universidad Politécnica de Cartagena.
[2] Ejército del Aire.

incorpora restricciones clave como la capacidad limitada de los talleres de mantenimiento, la secuenciación de tareas y la gestión de la fatiga diaria. Asimismo, se introduce una mejora en el modelado del mantenimiento mediante la inclusión de estrategias que permiten gestionar de forma automática tanto mantenimientos simples como combinados, adaptándose a las necesidades operativas reales. Los resultados obtenidos muestran que el modelo es capaz de generar planificaciones que minimizan los costes operativos y los tiempos de inactividad de la flota. Además, el modelo permite encontrar soluciones incluso cuando no todas las restricciones pueden cumplirse, mediante la introducción de penalizaciones que facilitan la comparación entre soluciones subóptimas. Se evalúan distintos casos de estudio, comparando varios horizontes temporales de optimización y analizando los resultados obtenidos. La herramienta desarrollada demuestra su viabilidad como sistema de apoyo a la decisión, aportando una mejora significativa en la eficiencia de la planificación. Su aplicación práctica permitiría optimizar de manera sistemática la gestión de operaciones y mantenimiento en entornos aeronáuticos complejos.

Palabras clave: Optimización, Programación Lineal Entera Mixta, Planificación, Mantenimiento de aeronaves.

145 – Robótica de intervención directa y manipulación flexible para mantenimiento asistido de equipamiento en entornos de defensa

Autores: Vélez García, Carlos[1]; Arias Canseco, Javier A.[1]; Fabregat Periago, María D.[1]; Orgilés Calpena, Elena[1]; Gómez Hernández, José Francisco[1]

Resumen. El mantenimiento, inspección y reparación de equipamiento empleado en defensa requiere soluciones capaces de operar sobre componentes de geometría variable, materiales flexibles y elementos de reducido espesor, manteniendo altos niveles de precisión, seguridad y trazabilidad. Estos retos son especialmente relevantes en el equipamiento del combatiente, como botas, mochilas, chalecos u otros elementos técnicos, donde la diversidad de diseños, el desgaste asociado al uso intensivo y la necesidad de intervención rápida dificultan la automatización mediante sistemas robóticos convencionales. En este contexto, el proyecto ROCCA plantea el desarrollo de tecnologías digitales avanzadas orientadas al control de calidad, la inspección y el mantenimiento asistido para defensa. Este desarrollo se centra en la robótica de intervención directa y la manipulación flexible, integrando percepción multimodal,

[1] INESCOP – Footwear Technology Centre.

inteligencia artificial, fabricación avanzada y teleoperación segura para abordar tareas complejas en entornos dinámicos y de alta incertidumbre. Esta línea integra soluciones en robótica colaborativa, visión artificial, sensorización, simulación de trayectorias y desarrollo de *grippers* y herramientas robotizadas para la manipulación de piezas delicadas, flexibles o deformables. El trabajo propone el desarrollo de sistemas sensóricos multimodales capaces de reconocer objetos, identificar zonas de intervención y estimar propiedades físicas relevantes para la manipulación, como rigidez, fricción o deformabilidad. Sobre esta base, se investigarán algoritmos de control híbridos que combinen técnicas clásicas de control con modelos de IA y aprendizaje automático, con el fin de anticipar el comportamiento de los materiales y adaptar la estrategia de agarre, posicionamiento y reparación. Asimismo, se contempla el diseño de manipuladores robóticos de altas prestaciones, incluyendo soluciones de intercambio de herramientas e impresión 3D, junto con entornos simulados y modelos de cálculo de colisiones en tiempo real para reforzar la seguridad durante operaciones teleoperadas o asistidas. La aplicación de estas tecnologías permitirá avanzar hacia celdas robóticas bimanuales capaces de inspeccionar, manipular y reparar equipamiento técnico de forma autónoma o semiautónoma, solicitando intervención remota cuando la complejidad de la tarea lo requiera. Los resultados esperados contribuirán a reducir tiempos de mantenimiento, mejorar la seguridad del personal, aumentar la vida útil del equipamiento y reforzar la autonomía operativa en escenarios de defensa y seguridad. Agradecimientos. Ayudas destinadas a Centros Tecnológicos de Excelencia «Cervera» convocatoria 2025. Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2024-2027. Proyecto ROCCA.

Palabras clave: Mantenimiento en defensa, Inspección equipamiento militar, Robótica colaborativa, Manipulación de materiales deformables, Sistemas robóticos adaptativos, Percepción multimodal.

221 – Sistema inteligente de apoyo a la decisión logística para la seguridad del personal en tareas críticas de Defensa

Autores: Moreno-Haya, Fernando[1]; Yenes-Gallego, José Ignacio[2]; Santos-Santos, Leopoldo[2]; López-Pingarron, Carlos[2]; Guerra-Llamas, Isabel[3]; Sanco Pareja, Lara[4]; Torrecilla, José S.[4]

Resumen. La fiabilidad del Apoyo Logístico del Ejército de Tierra no depende únicamente de los medios materiales, los repuestos, los procedimientos o la planificación, sino también del estado funcional del personal que ejecuta tareas críticas. En actividades como mantenimiento, conducción, manipulación de cargas, abastecimiento, almacenamiento o gestión de municionamiento, una disminución transitoria del rendimiento puede traducirse en errores, retrabajos, interrupciones del servicio, pérdida de disponibilidad y aumento del riesgo para la seguridad del militar. En este contexto, se presenta TERMOPS, un sistema de apoyo preventivo a la decisión logística basado en termografía facial e inteligencia artificial no supervisada. La solución propuesta permite captar imágenes térmicas

[1] Laboratorio Central del Ejército, Ejército de Tierra.
[2] Escuela Politécnica del Ejército, Ejército de Tierra.
[3] Dpto. de Enfermería, Universidad Complutense de Madrid.
[4] Dpto. Ingeniería Química y de Materiales. Universidad Complutense de Madrid.
[5] Dpto. Ingeniería Química de Materiales, Universidad Complutense de Madrid.

faciales de forma rápida, no invasiva y sin contacto físico, con el objetivo de identificar patrones funcionales atípicos que puedan justificar una actuación preventiva proporcionada antes de asignar o mantener determinadas tareas críticas. El sistema no tiene finalidad diagnóstica ni sustituye el criterio profesional o la cadena de mando; aporta una referencia objetiva, trazable e interpretable para reforzar la prudencia operativa, introducir verificaciones adicionales, modular temporalmente la asignación de cometidos o recomendar pausas cuando las circunstancias lo aconsejen. Desde el punto de vista técnico, TERMOPS integra captación termográfica, control de calidad de imagen, extracción de rasgos térmicos faciales, análisis mediante varios algoritmos de agrupamiento no supervisado y generación de una salida operativa basada en consenso. La metodología evita depender de grandes bases de datos etiquetadas y resulta especialmente adecuada para entornos militares, donde la variabilidad individual y operativa exige soluciones flexibles, escalables y robustas. La validación se desarrolló en tres niveles progresivos: un repositorio público de 3482 imágenes, una validación externa con 489 imágenes de población independiente y una prueba de concepto en entorno militar con 1934 imágenes de personal en activo. En conjunto, se analizaron 5905 imágenes, obteniéndose métricas elevadas y consistentes. En la fase militar, el sistema alcanzó una exactitud del 93,74 %, una sensibilidad del 94,83 %, una especificidad del 92,74 % y un F1-score del 93,55 %, lo que respalda su utilidad como herramienta preventiva en escenarios logísticos reales. TERMOPS aporta una innovación aplicada al ámbito de defensa al actuar sobre el factor humano como elemento crítico del sistema logístico. Su implantación progresiva puede contribuir a reducir errores evitables, mejorar la seguridad del personal, disminuir interrupciones y reforzar la continuidad del apoyo logístico en tareas de especial sensibilidad.

Palabras clave: Apoyo inteligente a la decisión logística, Continuidad del servicio logístico, Gestión preventiva del riesgo, Termografía facial, Seguridad operativa.

228 – LUNA: optimización logística federada con aprendizaje por refuerzo profundo y gemelo digital para la resiliencia de la cadena de abastecimiento en defensa

Autores: Zaera Mata, Sergio[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La disponibilidad operativa de las Fuerzas Armadas está directamente vinculada a la resiliencia de sus cadenas de abastecimiento. Los conflictos recientes han evidenciado la vulnerabilidad de las cadenas logísticas industriales ante disrupciones: escasez de componentes críticos, cuellos de botella productivos y dependencias de proveedores únicos. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) prioriza explícitamente la optimización del despliegue logístico y la reconfiguración ágil de los procesos productivos industriales como capacidades estratégicas urgentes. Las soluciones actuales –sistemas ERP/MRP y modelos de optimización estáticos– presentan limitaciones estructurales en entornos dinámicos: ausencia de reconfiguración en tiempo real, arquitecturas centralizadas incompatibles con los requisitos de confidencialidad industrial, y baja capacidad de coordinación en ecosistemas multiactor fragmentados. La literatura en logística de defensa carece de

[1] HI Iberia.

enfoques que integren simultáneamente optimización por refuerzo, privacidad federada y simulación cognitiva adaptativa. Este trabajo propone una arquitectura de optimización logística federada que integra tres capacidades nucleares: un gemelo digital cognitivo (GEMMA) para planificación y simulación en tiempo real; un agente de decisión autónoma basado en aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) que reconfigura rutas y asigna recursos ante disrupciones y un módulo de aprendizaje federado seguro, con cifrado homomórfico y privacidad diferencial, que preserva la soberanía del dato en ecosistemas multiactor. La arquitectura incorpora razonamiento contextual con modelos de lenguaje (LLM/MLLM) para interfaces explicables (XAI) y una línea exploratoria de optimización cuántica (QAOA/VQE) contrastada con DRL clásico. Esta propuesta extiende los conocimientos del proyecto BUHO —IA Federada para la Resiliencia de la Cadena de Abastecimiento Industrial— al dominio de defensa con multiactor federado. Los resultados de proyectos anteriores respaldan la viabilidad del aprendizaje por refuerzo para la optimización logística operativa en tiempo real. La presente propuesta extiende ese enfoque al dominio multiactor y de la defensa del Estado, para demostrar reducción del tiempo de reconfiguración ante disrupciones, mejora de la resiliencia operativa en gestión de inventario, y viabilidad del aprendizaje federado distribuido sin degradación apreciable frente a enfoques centralizados. Las capacidades técnicas desarrolladas –decisión autónoma resiliente, coordinación federada con soberanía del dato y simulación cognitiva adaptativa– son directamente transferibles a la logística de apoyo militar, con potencial de extensión a escenarios de bases avanzadas y reabastecimiento en condiciones adversas.

Palabras clave: Optimización logística, *Federated learning*, *Digital Twin*, Aprendizaje por refuerzo profundo, Sistema multiagente.

263 – Sistema modular aerotransportable para fabricación avanzada *in situ* en mantenimiento aeronáutico

Autores: Roves, Luis[1]; Pérez Jara, David[2]; Lee Perez, Erik[3]; Lopera Rodríguez, Manuel[4]; Lassagni, Fernando[5]; García, Virgilio[6]

Resumen. El presente artículo aborda el análisis, diseño y evaluación de configuraciones de un sistema avanzado, modular y aerotransportable orientado a la fabricación avanzada in situ de componentes destinados al mantenimiento y reparación de aeronaves en entornos operativos. Este trabajo se enmarca en el ámbito del mantenimiento desplegado, para la fabricación de ABDR (*Aircraft Battle Damage Repairs*), y no se limita al entorno de aeronaves, en escenarios con acceso limitado a infraestructuras logísticas, donde la capacidad de fabricación local resulta un factor crítico para garantizar la operatividad autónoma cuando la logística es compleja. La solución desarrollada (FAMU v2: *Forward Advanced Manufacturing Unit*, versión 2) consiste en un sistema compacto basado

[1] Director del Programa Aire y Espacio – Novaindef.
[2] Comandante MALOG/DIN/SUICA/SACAM del Ejército del Aire y del Espacio.
[3] Teniente del Ejército del Aire y del Espacio - Jefe taller fabricación MAESAL.
[4] Responsable de Programas (Novaindef).
[5] Director de Tecnología (Novaindef).
[6] Director ejecutivo (Novaindef).

en una arquitectura de dos módulos transportables que, mediante mecanismos de transformación estructural, configuran un espacio operativo ampliado equivalente a cuatro módulos. Este enfoque permite optimizar simultáneamente la eficiencia logística, la rapidez de despliegue y la funcionalidad operativa, constituyendo un avance relevante frente a configuraciones convencionales. Desde el punto de vista de ingeniería, el núcleo del trabajo se centra en el diseño mecánico y estructural de los módulos, incluyendo el desarrollo de mecanismos de desplegado y replegado robustos, repetibles y de fácil operación. Asimismo, se analizan soluciones para el alineamiento preciso y la unión estructural entre módulos, garantizando la continuidad funcional del sistema en condiciones de operación reales. Un aspecto clave del estudio es el desarrollo de sistemas de nivelación adaptativos para operación en terrenos no uniformes, los cuales permiten asegurar la estabilidad estructural, minimizar vibraciones y mantener la precisión requerida por los procesos de fabricación avanzada. El sistema integra nuevas capacidades de fabricación aditiva y sustractiva en metales y polímeros técnicos, junto con tecnologías de digitalización como escaneado 3D, ingeniería inversa y ensayos no destructivos, a los sistemas de reparación convencional ABDR (estructuras metálicas y compuestas) permitiendo la validación funcional in situ de los componentes producidos. Esta integración tecnológica habilita un enfoque completo de reparación y fabricación en entorno desplegado. En este sentido, el trabajo establece una base metodológica para el desarrollo de sistemas modulares de fabricación avanzada aplicados al ámbito de la defensa y otros entornos industriales con restricciones operativas.

Palabras clave: Fabricación avanzada *in situ*, Sistema modular aerotransportable, Mantenimiento aeronáutico, Reparación de daños de combate en aeronaves (ABDR), Despliegue en entornos operativos limitados con limitaciones logísticas.

265 – Soluciones de reparación mediante fabricación aditiva para sistemas de combustible del F-18

Autores: Luis Roves[1]; David Perez Jara[2]; Erik Lee Perez[3]; Gonzalo Estapia Guzman[4]; Jaime García Benitez[5]; Jose Santos Muñoz[6]; Manuel Romera[7]; Manuel Abellan[8]; Steven Lombana[9]; Javier Vidal[9]; Fernando Lassagni[10]; Virgilio Garcia[11]

Resumen. El presente artículo se centra en el estudio y la evaluación de soluciones avanzadas de reparación mediante fabricación aditiva para componentes críticos del sistema de combustible del caza F-18, concretamente en tramos de tubería ubicados en zonas de difícil acceso en el interior de las alas, donde las operaciones convencionales de desmontaje y reparación resultan técnicamente inviables. El problema abordado

[1] Director del Programa Aire y Espacio – Novaindef.
[2] Comandante MALOG/DIN/SUICA/SACAM del Ejército del Aire y del Espacio.
[3] Teniente del Ejército del Aire y del Espacio - Jefe taller fabricación MAESAL.
[4] Asistente técnico en MAESAL - UTE Indra Sistemas- IPT Aero.
[5] Jefe de personal AT de estructura.
[6] Ingeniero de Estructuras; [7]Responsable Ingeniería Inversa (Novaindef).
[8] Técnico Escáner 3D, digitalización y FFF (Novaindef); [9]Técnico AM en PBF-L (Novaindef).
[10] Director de Tecnología (Novaindef).
[11] Director ejecutivo (Novaindef).

se origina en un segmento del tubo de fuel con geometría compleja en forma de «S», unido mediante un cordón de soldadura que, debido a las condiciones operativas del avión (vibraciones, flexiones y fatiga estructural) experimenta una degradación progresiva, generando daños comprometiendo la integridad del sistema y la operatividad de la aeronave. Se propone un enfoque innovador basado en la aplicación de tecnologías de fabricación aditiva metálica tipo PBF-L (*Powder Bed Fusion – Laser*) en aluminio, orientado al diseño, caracterización y validación experimental de soluciones de reparación adaptadas al entorno operativo real. Como resultado del análisis desarrollado en esta investigación, se han abordado dos estrategias de reparación diferenciadas en función del tamaño y grado del daño, ambas concebidas para eliminar la dependencia de aspectos derivados la construcción original del elemento (p. ej., uniones soldadas) y mitigar los efectos de concentración de tensiones derivados de la geometría curvada del tubo. Estas soluciones permiten restituir la funcionalidad estructural del componente, corrigiendo además posibles deformaciones en la sección circular del tubo y mejorando su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos y fatiga. Un aspecto clave del desarrollo ha sido la optimización del diseño para su instalación en espacios confinados, facilitando la intervención directa por parte del personal de mantenimiento sin necesidad de desmontaje, lo que supone una mejora sustancial en eficiencia operativa. También debe comentarse el enorme trabajo de ensayos y certificación como pieza aeronavegable del sistema de combustibles de una aeronave.

Palabras clave: Mantenimiento en zonas de difícil acceso del F-18, Reparación estructural en sistemas de combustible, Fabricación avanzada por tecnología PBF-L, Fatiga estructural y vibraciones.

277 – Empleo de técnicas SLM/DED para el soporte logístico de componentes metálicos críticos de armas en teatro de operaciones

Autores: Ramírez Perea, Cristian[1]; Hernández Bay, David[2]; Cantero Obregón, Antonio[2]; López Pingarrón, Carlos[2]; Santos-Santos, Leopoldo[3]

Resumen. El empleo de tecnologías de fabricación aditiva en metal como SLM (*Selective Laser Melting*) y DED (*Directed Energy Deposition*) representan una solución altamente relevante para el soporte logístico de componentes críticos de armamento en zona de operaciones. Estas tecnologías permiten fabricar repuestos directamente en el teatro operativo, reduciendo de forma significativa la dependencia de cadenas logísticas tradicionales, caracterizadas por elevados costes, tiempos de suministro prolongados y necesidad de grandes stocks. En este contexto, la fabricación in situ de piezas como el émbolo del fusil HK G36 E, pieza reproducida y ensayada con éxito en el presente estudio por sus características críticas de presión y temperatura de trabajo, constituye una alternativa viable para garantizar la continuidad operativa en dichos escenarios donde el abastecimiento convencional es limitado. Uno de los aspectos clave analizados es la influencia de las restricciones legales y de patentes.

---

[1] Teniente (FAS – ET).
[2] Comandante (FAS – ET).
[3] Teniente coronel (FAS – ET).

El estudio contempla las restricciones y la forma de evadir ilegalidades, evitando conflictos de propiedad intelectual y habilitando el uso de tecnologías aditivas como solución operativa legítima. Desde el punto de vista tecnológico, SLM y DED presentan limitaciones inherentes, principalmente asociadas a la fabricación capa a capa, que introduce anisotropía, variabilidad microestructural y defectos internos como porosidad. Estos defectos afectan directamente a las propiedades mecánicas del material. Estudios experimentales demuestran que la porosidad, caracterizada mediante técnicas avanzadas, tiene una correlación directa con la degradación del comportamiento mecánico, siendo un factor crítico en la validación de piezas críticas. Para garantizar la calidad, se emplean tanto ensayos destructivos como no destructivos. Entre los primeros se han realizado ensayos de dureza, que permiten verificar la adecuación de las propiedades mecánicas frente a los requisitos operativos, las cuales han proporcionado valores superiores a la pieza original. Por otro lado, la tomografía computarizada de rayos X (TCX) se posiciona como una herramienta clave no destructiva, capaz de identificar defectos internos, distribución de poros y heterogeneidades sin comprometer la integridad de la pieza, garantizando una trazabilidad en procesos de calidad. Esta técnica permite validar la calidad estructural y reducir la necesidad de ensayos destructivos, optimizando costes, tiempos de validación y selección de piezas no aptas. Finalmente, los resultados experimentales confirman que las piezas fabricadas mediante SLM y DED cumplen con los requisitos dimensionales, térmicos y funcionales, incluyendo ausencia de fugas y correcto comportamiento en condiciones reales de uso llevadas a cabo en el INTA de la Marañosa. En conjunto, estas tecnologías permiten reducir costes de la cadena logística, reducir tiempos de respuesta y aumentar tiempos de operatividad de los activos, consolidándose como una solución estratégica para el mantenimiento de sistemas de armas en entornos exigentes y de reducido espacio, como un submarino.

Palabras clave: Fabricación aditiva en metal, SLM, DED, HK G36 E, Balística interior, Logística militar, Componentes críticos, Zona Operaciones, Émbolo fusil HK G36 E, Restricciones legales, Patentes, Porosidad en metales, Ensayos destructivos, Ensayos no destructivos, Tomografía computarizada rayos X (TCX), Procesos de calidad, Ensayo, Dureza.

Área 4
BASES E INSTALACIONES

4.2
Energía en bases e instalaciones

54 – Contenedores de vida en bases militares: ¿cómo hacer más económica su eficiencia energética?

Autora: Rubio, María Ángeles[1]

Resumen. Las Fuerzas Armadas han quedado históricamente excluidas de los compromisos internacionales obligatorios de reducción de emisiones, como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París. Sin embargo, desde la Cumbre de la OTAN de Chicago en 2012, la eficiencia y la seguridad energéticas se han consolidado como prioridades estratégicas de la defensa colectiva. Esta tendencia se ha intensificado recientemente: en la cumbre climática de 2024 se ejerció una gran presión para que las fuerzas armadas asumieran compromisos de medición y reducción de emisiones, y desde 2020 la OTAN ha publicado distintos estándares STANAG sobre buenas prácticas en eficiencia energética y gestión medioambiental, que progresivamente se irán convirtiendo en normas de obligado cumplimiento para los países aliados. En este contexto, el consumo energético asociado al confort habitacional de las bases militares en el exterior resulta sobre todo problemático. Los datos son elocuentes: un estudio de Defence Energy Data realizado en 2017 en veintidós países miembros reveló que el 32 % del consumo energético militar correspondía a

[1] Centro Universitario de la Defensa (Universidad de Zaragoza).

la climatización de instalaciones. Además, el 75 % del abastecimiento se realizaba con hidrocarburos y tan solo el 0,6 % procedía de fuentes renovables. El presente trabajo aborda esta problemática comparando dos módulos de vida construidos a partir de contenedores de veinte pies. El primero es un prototipo de nueva construcción diseñado y certificado según el estándar Passivhaus, instalado en el Batallón de Zapadores I en Zaragoza, donde opera desde 2022. El segundo es un módulo convencional adquirido de segunda mano, con características similares a los contenedores actualmente disponibles para el Ejército, instalado en la Academia General Militar de Zaragoza desde octubre de 2025, al que se está aplicando una intervención conforme al estándar de rehabilitación ENERPHIT. Partiendo de garantizar en ambos casos condiciones adecuadas de confort habitacional (temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2, entre otras), el estudio analiza y compara los costes económicos de los consumos energéticos necesarios para mantener dichas condiciones, así como los costes asociados a la construcción del contenedor desde el origen, en el primer caso, y al estado actual y la rehabilitación de un contenedor existente, en el segundo. El objetivo es aportar información completa, sobre costes de inversión y costes operativos, que permita orientar la toma de decisiones hacia la opción más eficiente energética y económicamente.

Palabras clave: Eficiencia energética, Contenedores de vida, Confort habitacional, Estándar Passivhaus, Estándar Enerphit, Viabilidad económica.

140 – Soluciones avanzadas de climatización y gestión térmica para la mejora de la eficiencia energética y la resiliencia operativa en infraestructuras militares

Autores: Ledo Bañobre, Raquel[1]; Dios Álvarez, Miguel Ángel de[1]; Bandrés Diéguez, Carlos[1]; Paredes Barros, Esteban[1]; García Murias, Denise[1]

Resumen. La eficiencia energética y la resiliencia operativa de las bases militares constituyen un elemento estratégico para garantizar la continuidad de misión y la sostenibilidad de las infraestructuras de defensa, tanto en instalaciones permanentes como en emplazamientos desplegables o aislados. En este contexto, el presente trabajo propone una solución integrada de climatización avanzada orientada a optimizar el comportamiento energético de edificios e instalaciones militares, combinando almacenamiento térmico, emisión de calor por radiación, enfriamiento pasivo/activo y estrategias avanzadas de control. Este trabajo se fundamenta en el uso de materiales de cambio de fase (PCM) para incrementar la inercia térmica efectiva de la envolvente, permitiendo desplazar cargas térmicas, amortiguar picos de demanda y mejorar la estabilidad térmica interior. De forma complementaria, se incorporan superficies radiantes

[1] CTAG – Centro Tecnológico de Automoción de Galicia.

eléctricas basadas en recubrimientos eléctricamente conductores, capaces de proporcionar una emisión térmica distribuida, controlable y adaptable a distintas configuraciones constructivas. La combinación de ambas tecnologías da lugar a dispositivos híbridos tipo HAL PCM (*Hybrid Active Layer Phase Change Material*), que emplean arquitecturas multicapa donde los PCM y las superficies radiantes se combinan para maximizar la eficiencia en el almacenamiento, liberación y gestión activa de la energía térmica. Por otro lado, el trabajo también incluye el estudio y evaluación de sistemas de enfriamiento novedosos orientados a reducir la demanda energética de climatización, especialmente en escenarios de altas cargas térmicas. Entre ellos destacan las soluciones basadas en ventilación difusa a través de textiles 3D, que permiten una distribución homogénea de aire, mejorando la evacuación de calor con bajas tasas de caudal y presión. Asimismo, se analizan intercambiadores de calor de geometrías adaptables, capaces de modificar su configuración en función de las condiciones operativas para optimizar la transferencia térmica. De forma complementaria, se estudian pigmentos reflectantes en el rango infrarrojo del espectro electromagnético, aplicables a cubiertas y envolventes, destinados a reducir la absorción de radiación solar manteniendo los patrones de camuflaje habituales. Partiendo de esta base, se plantean estrategias de gestión energética inteligente que coordinan generación, almacenamiento y demanda energética en función de la ocupación, las condiciones ambientales y la energía disponible. En conjunto, la integración de almacenamiento térmico, emisión de calor por radiación, enfriamiento avanzado y control predictivo ofrece una alternativa escalable para reforzar la seguridad energética, la autonomía y la resiliencia operativa de las infraestructuras militares en escenarios exigentes.

Palabras clave: Eficiencia energética, Resiliencia operativa, Materiales de cambio de fase (PCM), Climatización avanzada, Emisión térmica radiante, Almacenamiento térmico, Sistemas HAL-PCM, Enfriamiento pasivo y activo, Gestión energética inteligente, Infraestructuras militares.

4.3
Modernización bases e instalaciones

151 – Arquitectura de referencia para una base aérea conectada, sostenible e inteligente: automatización, resiliencia, ciberseguridad y conciencia situacional en entornos de uso dual

Autores: Gallego-Madrid, Jorge[1]; Ortiz, Jordi[1]; Molina Zarca, Alejandro[1]; Banegas-Luna, Antonio Jesús[1]; Poveda-García, Miguel[1]

Resumen. La creciente digitalización de los entornos operativos de defensa y seguridad exige infraestructuras capaces de proporcionar servicios de comunicaciones y computación en condiciones dinámicas, adversas y potencialmente hostiles, preservando resiliencia, adaptabilidad y seguridad. Este trabajo plantea una arquitectura de referencia para bases militares de uso dual alineada con el concepto BACSI (Base Aérea Conectada, Sostenible e Inteligente) del Ejército del Aire y del Espacio. La propuesta integra capacidades de automatización de red, observabilidad, ciberseguridad y soporte inteligente a la decisión sobre una infraestructura convergente de red y computación distribuida, preparada para dominios heterogéneos, virtualización, alta disponibilidad y despliegue flexible de funciones y servicios. Sobre esta base se define un plano

[1] Centro Universitario de la Defensa de San Javier (CUD San Javier).

transversal de observabilidad multidominio que recopila en tiempo real métricas, eventos, registros y contexto operativo para facilitar supervisión continua, análisis contextual y respuesta adaptativa. A partir de dicha observación, la arquitectura incorpora un dominio de gestión, orquestación y control inteligente mediante bucles automatizados de supervisión, análisis, decisión y ejecución. Este grado de automatización refuerza la orquestación de la ciberseguridad, al permitir medidas proactivas y reactivas para anticipar amenazas, detectar anomalías y coordinar contramedidas acordes con el estado operativo del sistema. Como escenario ilustrativo, se considera la detección, localización y seguimiento de un actor hostil mediante información de conectividad, posicionamiento y sensores visuales, apoyada en inteligencia artificial desplegada sobre la infraestructura distribuida. Más que una solución cerrada, el trabajo propone un marco inicial para investigar infraestructuras digitales autónomas, seguras, resilientes y orientadas a la conciencia situacional.

Palabras clave: BACSI, Ciberseguridad, Soporte inteligente a la decisión, Uso dual.

Área 5
PLATAFORMAS TERRESTRES

5.4
Robótica terrestre

75 – *Framework* para mejora de las funcionalidades de navegación e independencia táctica de plataformas terrestres autónomas en condiciones degradadas

Autores: Dueñas, Juan[1]; Uribe, Karen[1]; García, Álvaro[1]; Romo, Javier[1]

Resumen. La investigación de soluciones que permitan a las plataformas autónomas terrestres actuar con independencia táctica mediante algoritmos de decisión local y navegación autónoma robusta sigue siendo un desafío abierto, especialmente en escenarios reales donde amenazas de seguridad operativa pueden afectar a los sistemas globales de posicionamiento. Estas limitaciones generan incertidumbres que comprometen el guiado inteligente, el control y la toma de decisiones. En este contexto, y alineado con iniciativas como COMANDO, este trabajo propone un *framework* físico y virtual de estimación y percepción para integrar técnicas avanzadas de posicionamiento y navegación en ausencia de GNSS. La solución incorpora procesamiento de imagen, mapeado del terreno y dinámica de locomoción basada en robótica terrestre como fuentes de información complementarias. Su principal contribución es

[1] Fundación CIDAUT.

una arquitectura de fusión multisensorial orientada a la reconstrucción del entorno y a la estimación adaptativa para asistir localmente la toma de decisiones. Inspirado en estrategias recientes de mapeo tridimensional en robótica móvil, el método introduce un filtro adaptativo iterativo que ajusta la fusión sensorial en tiempo real y mejora la consistencia entre sensores inerciales, odometría y cámaras de profundidad. Esta integración favorece la conciencia situacional, la navegación precisa y la detección temprana de obstáculos en terrenos complejos. Los resultados esperados apuntan a mejorar las funcionalidades autónomas en condiciones degradadas y la adaptación frente a incertidumbres no modeladas, avanzando hacia plataformas terrestres más robustas y fiables.

Palabras clave: Denegación GNSS, Independencia táctica, Navegación autónoma, Plataforma terrestre, Robótica móvil.

137 – Sistemas autónomos cooperativos duales con percepción y navegación resiliente en entornos degradados y hostiles

Autores: Lattarulo, Ray[1]; Diaz, Sergio[1]; Gutiérrez, José Ángel[1]

Resumen. Este artículo presenta los objetivos y el enfoque inicial de un proyecto de investigación orientado al desarrollo de sistemas autónomos avanzados para operaciones de búsqueda y reconocimiento en entornos complejos, degradados y potencialmente hostiles, con aplicación tanto militar como civil. El proyecto se centra en mejorar las capacidades de percepción y navegación de vehículos no tripulados terrestres (UGV) y aéreos (UAV), permitiendo su operación eficaz bajo condiciones adversas de visibilidad, comunicación y posicionamiento. Uno de los objetivos principales es desarrollar soluciones de percepción robustas capaces de detectar y clasificar posibles objetivos de rescate e identificar amenazas en escenarios con visibilidad parcial, oclusiones y presencia de polvo, humo o niebla. Para ello, se investigan técnicas de fusión sensorial multimodal combinadas con modelos avanzados de inteligencia artificial, con el fin de incrementar la fiabilidad y precisión de la detección en contextos inciertos. Un segundo objetivo es integrar modelos de lenguaje de gran escala (LLM) y modelos visión-lenguaje (VLM) para dotar a los

[1] TECNALIA.

sistemas de comprensión contextual del entorno operativo. Estas capacidades asistirán la toma de decisiones y guiarán la navegación de UGV y UAV durante periodos de degradación o denegación de señales críticas, como comunicaciones o GNSS, garantizando la continuidad de la misión hasta la recuperación de capacidades completas. Finalmente, el proyecto contempla un demostrador integrado con plataformas aéreas y terrestres para ejecutar maniobras colaborativas de búsqueda y reconocimiento en escenarios representativos.

Palabras clave: Cooperación entre vehículos, GNSS *denied*, UAV, UGV.

149 – Kit autónomo embarcable para robótica en entornos subterráneos hostiles: SLAM multimodal, percepción avanzada y comunicaciones resilientes para rescate

Autores: Placed, Julio A.[1]; Lázaro, Maria T.[1]; Sierra, Fernando[1]; Sánchez, Lidia[1]; Pérez, Guillermo[1]; Gómez, Lidia[1]; Barcelona, Miguel Ángel[1]

Resumen. Tras incidentes críticos como incendios, explosiones o colapsos estructurales, el acceso humano a entornos subterráneos puede resultar peligroso o inviable en las fases iniciales, cuando la información es esencial para la toma de decisiones y la localización de víctimas. Estos escenarios presentan ausencia de GNSS, visibilidad degradada por humo o polvo, atmósferas contaminadas y severas limitaciones de comunicaciones. Se propone un kit sensorizado embarcable para dotar a plataformas robóticas cuadrúpedas de capacidades avanzadas de percepción, localización y toma de decisiones. La arquitectura integra percepción multimodal y multiespectral, localización y mapeado sin GNSS mediante SLAM, navegación asistida y análisis semántico del entorno. La combinación de radares mmWave, sensores térmicos/SWIR, sistemas ópticos convencionales y LiDAR permite detectar personas, objetos y obstáculos

[1] Instituto Tecnológico de Aragón.

en condiciones de baja visibilidad, generando mapas tridimensionales enriquecidos semánticamente. Además, el sistema incorpora sensores de calidad ambiental para monitorizar gases, temperatura y partículas en suspensión, integrando estos datos como capas semánticas para caracterizar dinámicamente el riesgo y apoyar la planificación de trayectorias. Un componente clave es la infraestructura de comunicaciones inalámbricas basada en redes MANET, que facilita la transmisión en tiempo real de datos críticos y la teleoperación bajo condiciones adversas. La capacidad de despliegue dinámico de nodos en múltiples robots mejora la escalabilidad y el alcance operativo. En conjunto, la solución integra SLAM robusto, percepción multimodal basada en IA y comunicaciones resilientes para mejorar la seguridad, reducir tiempos de respuesta y aumentar la eficacia de misiones de rescate.

Palabras clave: *Emergency robotics*, GNSS-*denied localization*, *Multimodal perception*, *Search and rescue*, SLAM, *Underground robotics*.

Área 6
PLATAFORMAS NAVALES

6.1
Diseño de plataformas navales

26 – Optimización orientada a misión de una fragata DTMB mediante predicción IA del comportamiento en la mar y evaluación masiva de operatividad

Autores: Romero Tello, Pablo[1]; Gutiérrez Romero, José Enrique[1]; Serván Camas, Borja[2]; Lorente López, Antonio José[1]

Resumen. La operatividad de buques de combate depende de que la plataforma mantenga, con seguridad y eficacia, capacidades críticas en un amplio espectro de estados de mar. En este trabajo, se propone una metodología de análisis masivo y optimización geométrica para mejorar el comportamiento en la mar de una fragata tipo DTMB 5415, combinando predicción hidrodinámica acelerada mediante inteligencia artificial con una evaluación probabilista orientada a misión. Se define un espacio de diseño de cinco parámetros geométricos del casco (eslora, manga, calado y coeficientes de forma), manteniendo constante el desplazamiento. Mediante muestreo Latin Hypercube se generan 257 candidatos. Para cada alternativa se obtienen las funciones de respuesta en frecuencia (RAO) con la herramienta SPRAI, que reemplaza cálculos hidrodinámicos tipo BEM por redes neuronales y posibilita evaluaciones casi instantáneas,

[1] Dpto Física Aplicada y Tecnología Naval (UPCT).
[2] Centre Internacional de Metodes Numerics en Enginyeria (CIMNE).

con aceleraciones reportadas de hasta 4000×. A partir de las RAO y de los espectros de oleaje se calculan indicadores clave (KPI) relevantes para la operación: MSI, máximos de cabeceo y balance, aceleraciones RMS vertical y horizontal, embarque de agua en cubierta, emersión de hélice y *slamming*, entre otros. Estos KPI se integran en una métrica de efectividad operacional (OE) que combina probabilidades de ocurrencia de estados de mar con factores de zona, rumbo, velocidad y estación, imponiendo el cumplimiento de cada KPI como condición binaria. El caso de estudio considera cuatro zonas operativas y un perfil operacional con seis velocidades, siete rumbos y cuatro estaciones, lo que implica 2,6×10^6 evaluaciones por buque. Como verificación inicial, se compara la OE anual del buque base obtenida con Hydrostar frente a la estimada con SPRAI, observándose un error relativo del 7,00 %. En la campaña de optimización, la OE global del diseño original se incrementa hasta un máximo del 99,05 %, mientras que la zona recomendada de diseño alcanza una capacidad operativa media del 90,3 %. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad para cuantificar la influencia de los parámetros de diseño sobre la operatividad y se discuten las implicaciones de los resultados para el diseño preliminar de plataformas navales.

Palabras clave: *Machine learning*, *Frigate optimization*, *Operational effectiveness*, *Seakeeping performance*, STANAG *criteria*.

66 – Análisis hidroelástico totalmente acoplado de buques, acelerado mediante técnicas de reducción de la matriz modal

Autores: Lorente López, Antonio José[1]; García-Espinosa, Julio[2]; Gutiérrez Romero, José Enrique[3]; Serván Camas, Borja[4]; Romero Tello, Pablo[3]

Resumen. El diseño de un buque o artefacto marino se realiza con el objetivo de garantizar una larga vida útil. Uno de los elementos clave a la hora de alcanzar este objetivo es su estructura, pues es la encargada de soportar los enormes esfuerzos propios de la navegación en alta mar. La exposición continua a oleaje irregular convierte a la fatiga estructural en uno de los mecanismos de daño más relevantes en ingeniería naval, siendo su evaluación precisa una tarea de elevada complejidad computacional. El objetivo de este trabajo es presentar un método de evaluación estructural mediante la aplicación de un modelo hidroelástico dinámico, basado en un modelo FEM de detalle de toda la estructura. Se propone una metodología que permite reducir de forma muy significativa el tiempo de cálculo sin pérdida de precisión, garantizando así eficiencia suficiente

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica de la UPCT.
[2] Departamento de Arquitectura, Construcción y Sistemas Oceánicos y Navales, Universidad Politécnica de Madrid.
[3] Dpto. Física Aplicada y Tecnología Naval (UPCT).
[4] Centre Internacional de Metodes Numerics en Enginyeria (CIMNE).

para su aplicación práctica en condiciones de servicio reales. Dicha metodología se basa en el precálculo de las RAO modales (MRAO) para una base modal suficientemente amplia como para aproximar la solución de alta precisión del modelo FEM original, pero lo bastante reducida como para disminuir drásticamente los tiempos de computación de las simulaciones hidroelásticas. Como aportación adicional, se introduce una técnica de enriquecimiento de la base modal mediante la incorporación de vectores de deformación y tensión obtenidos a partir de estados de carga representativos de la operación del buque. Una vez obtenidas las amplitudes modales mediante realización temporal del espectro de oleaje, la historia de tensiones en cualquier punto de interés de la estructura se reconstruye en posproceso mediante superposición modal. Esto permite realizar el análisis de daño acumulado por fatiga, ponderando los resultados con estadísticas reales de estados de mar. El modelo se ha implementado en SeaFEM, lo que permite el cálculo de MRAO mediante análisis hidroelásticos acoplados. Se demuestra la eficacia de la metodología propuesta sobre un buque ferry en servicio, modelado con un elevado grado de detalle a partir de sus planos estructurales.

Palabras clave: Hidroelasticidad, Modelo de orden reducido, Fatiga estructural.

6.2
Control, energía y propulsión naval

46 – Viabilidad de la integración de sistemas de captura de CO2 poscombustión en plataformas navales de defensa

Autores: García Gámez, Francisco Javier[1]; Sanchis Pacheco, Enrique José[1]; Piqueras Cabrera, Pedro[1]; López Núñez, Javier[2]; Martínez Escondrillas, Javier[2]; Méndez Macías, Miguel[2]

Resumen. La descarbonización de la propulsión marina constituye un reto clave para cumplir los objetivos de la Organización Marítima Internacional, que establece la neutralidad climática en 2050. En aplicaciones de defensa, donde la sustitución de motores de combustión interna no es viable a corto plazo, la captura poscombustión de CO_2 permite actuar sobre plataformas existentes sin afectar su operatividad. El instituto CMT Clean Mobility and Thermofluids de la Universitat Politècnica de València ha desarrollado, en colaboración con Navantia, un estudio de aplicación de esta tecnología en un banco de ensayo de motores marinos, utilizando datos reales de un grupo generador diésel de 3 MW de potencia nominal en distintos niveles de carga. Se evaluaron tecnologías de captura poscombustión como absorción, adsorción, membranas y procesos criogénicos en términos de eficiencia de captura, pureza del CO_2, consumo

[1] Universitat Politècnica de València, CMT-Clean Mobility & Thermofluid.
[2] Navantia.

energético y viabilidad de integración. Para las condiciones analizadas, con bajas concentraciones de CO_2, la absorción química con aminas es la única que presenta un funcionamiento robusto, gracias a su elevada selectividad y capacidad de reacción incluso a bajas presiones parciales. El gas de escape presenta niveles de contaminantes incompatibles con el proceso de absorción. Esto requiere un acondicionamiento previo mediante un sistema de postratamiento compuesto por un catalizador de oxidación, un filtro de partículas y un sistema de reducción catalítica selectiva que reducen los contaminantes a niveles compatibles con el sistema de captura, tras lo cual el gas se enfría y se reduce su contenido en agua antes de entrar al sistema de captura. El sistema de captura se evalúa considerando como variables principales el tamaño del absorbedor y del regenerador, la relación líquido-gas y la potencia térmica aportada, buscando el compromiso entre eficiencia de captura, tamaño y consumo. La regeneración del disolvente constituye el principal consumo energético del conjunto, aunque puede reducirse de forma apreciable aprovechando el calor disponible en el gas de escape. Además, se pone de manifiesto una relación no lineal entre el objetivo de captura y la demanda térmica que permite identificar configuraciones más favorables según los requisitos operativos. El estudio se completa con la evaluación de la etapa de purificación y densificación del CO_2 capturado en fase líquida para facilitar su almacenamiento y transporte. El trabajo proporciona arquitecturas y órdenes de magnitud de tamaño y consumo para la integración de sistemas de captura de CO_2 en motores navales de defensa, estableciendo criterios de diseño bajo condiciones representativas y definiendo el compromiso entre captura y penalización energética.

Palabras clave: Captura poscombustión de CO_2, Propulsión naval de defensa, Absorción química con aminas, Decarbonización marina, Motores diésel, Marinos.

166 – Estudio experimental de reducción de resistencia por microburbujas en el canal de aguas tranquilas

Autores: Diaz-Torrijos, Patricia[1]; Rosa, Juan Carlos de la[1]; Tabero, Jesus[1]; Aspas, Alberto[1]; Luis Sanchez, Pedro[1]; Mendi, Suthyvann[1]; García-Magariño, Adelaida[1]

Resumen. La disminución de la resistencia hidrodinámica por medio de la inyección de microburbujas ha sido objeto de estudio en geometrías simplificadas como placas planas; en cambio, su uso en geometrías más cercanas a la realidad, como los perfiles hidrodinámicos expuestos a gradientes de presión, sigue necesitando una caracterización experimental más exhaustiva. De hecho, la interacción entre la dinámica de burbujas, el desarrollo de la capa límite y la distribución de presión en el perfil no está del todo comprendida. En el presente trabajo, se muestra el trabajo experimental en curso para caracterizar la reducción de resistencia por inyección de microburbujas en un perfil bidimensional completamente sumergido y arrastrado en un canal de aguas tranquilas. El modelo, de 1 m de cuerda y 2 m de envergadura es ensayado a distintas velocidades. La generación de microburbujas es producida por electrólisis a partir de electrodos distribuidos a lo largo de ambas caras del perfil, lo que permite

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas».

el control espacial de la inyección. Se ha diseñado una matriz de ensayos que analiza la influencia de la velocidad de avance, las condiciones eléctricas de generación y la localización de la inyección sobre la resistencia hidrodinámica medida por un dinamómetro de seis componentes. El objetivo en este trabajo es determinar en qué condiciones la inyección de microburbujas permite obtener mejores resultados, habiéndose prestado especial atención al desarrollo de la capa límite y a los correspondientes gradientes de presión. Además, se ha previsto la caracterización adicional del campo fluido mediante técnicas ópticas que nos permitan estudiar la distribución de las burbujas y su interacción con el flujo. Los resultados obtenidos se espera que ayuden a comprender mejor los mecanismos de reducción de resistencia en flujos no uniformes y a su posible aplicación en sistemas de propulsión naval.

Palabras clave: *Microbubble Drag Reduction* (MBDR), Resistencia de fricción, Perfiles hidrodinámicos.

173 – Novedoso montaje experimental para estudios de viscosidad en el ámbito naval

Autores: Gavilán, Pablo[1]; Aspas, Alberto[1]; Mendi, Suthyvann[2]; Tabero, Jesús[2]; García-Magariño, Adelaida[2]

Resumen. Los esfuerzos viscosos constituyen una de las principales fuentes de consumo energético en la propulsión de plataformas navales. Por tanto, la reducción de dichos esfuerzos contribuye directamente a disminuir la energía requerida y a aumentar la eficiencia operativa y la autonomía de la embarcación. Entre las diversas técnicas desarrolladas para mitigar la resistencia viscosa en superficies mojadas, una de las más prometedoras es la reducción de resistencia mediante microburbujas (MBDR). Este enfoque ha demostrado la capacidad de reducir los esfuerzos viscosos hasta en un 80 % en placas planas, requiriendo al mismo tiempo una entrada de energía relativamente baja, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia propulsiva neta. En la actualidad, no existe un marco teórico integral que explique por completo la complejidad de los mecanismos involucrados y persisten discrepancias significativas en la literatura en cuanto a sus fundamentos físicos. Con el fin de avanzar en la comprensión de este fenómeno, el presente estudio investiga la influencia de las microburbujas en el desarrollo del flujo, centrándose en su efecto sobre el transporte de cantidad de movimiento dentro de la capa límite y en

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas».

su impacto sobre la viscosidad cinemática local. Para ello, se propone un novedoso montaje experimental basado en el primer problema de Stokes (también conocido como problema de Rayleigh). En esta configuración, una placa plana se encuentra inicialmente en reposo y sumergida en una solución acuosa dentro de un tanque. Posteriormente, la placa es sometida a un arranque impulsivo, tras el cual se desplaza a velocidad constante mientras genera microburbujas a lo largo de su superficie. Mediante la comparación de los resultados experimentales con la solución analítica del caso monofásico, el estudio pretende caracterizar la influencia de la distribución y las propiedades físicas de las burbujas en la formación y evolución de la capa de cizalladura. Se espera que los resultados obtenidos aporten nuevos conocimientos sobre el mecanismo de MBDR a través de este enfoque innovador de arranque impulsivo. Asimismo, contribuirán a mejorar la precisión de los modelos numéricos que dependen de la calibración de parámetros a partir de datos experimentales, así como a explorar los efectos de la MBDR en condiciones de flujo acelerado. En última instancia, estos hallazgos podrían respaldar la aplicación de la tecnología MBDR a una gama más amplia de sistemas hidrodinámicos y vehículos marinos, mejorando su eficiencia energética y su rendimiento.

Palabras clave: Hidrodinámica naval, Reducción de resistencia, Mecánica de fluidos multifase.

248 – *Dual-use validation infrastructure for small-scale marine energy converters: naval applications of the MED-Hubs testbed* (Cartagena, Spain)

Autores: Gutiérrez Romero, José Enrique[1]; Romero Tello, Pablo[2]; Lorente López, Antonio José[3]; Esteve Pérez, Jerónimo Antonio[3]; López-Belchí, Alejandro[2]; Mascaraque Ramírez, Carlos Arsenio[3]; López Castejón, Francisco[1]; Rodríguez de Mesas, Carolina Aleida[1]

Resumen. This paper presents the Marine Energy Hub established under the MED-Hubs project (EMFAF-2025-PIA-FLAGSHIP, Proposal 101241440) and analyses its dual-use potential for naval technology development. The hub provides a structured, multi-environment validation pathway for small-scale wave and current energy converters (WECs/TECs) targeting TRL 3–7 progression, with direct applicability to defence-relevant maritime energy systems. The platform comprises three instrumented testing environments: (i) a recirculating hydrodynamic channel (GUNT HM162) enabling controlled parametric characterisation of device hydrodynamics, power take-off efficiency, and structural loads

[1] Universidad Politécnica de Cartagena.
[2] Dpto. Física Aplicada y Tecnología Naval (UPCT).
[3] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica de la UPCT.

under defined wave and current spectra; (ii) a near-shore restricted navigation zone instrumented with an ADCP current profiler and meteorological station, providing real sea-state data for validation against numerical models; and (iii) four operational port environments on the Murcian littoral, allowing full-scale deployment under variable bathymetric and tidal conditions. UPCT's in-house CFD and SPH modelling capabilities support continuous numerical-experimental correlation throughout the TRL ladder. From a defence engineering perspective, the testbed's instrumentation suite and port-access agreements are directly applicable to: characterisation of energy-harvesting modules for persistent-endurance USV and AUV platforms; acoustic and hydrodynamic signature assessment of hull-integrated converter concepts; and performance quantification of distributed wave energy microgrids for forward-deployed coastal sensor networks. The geographical setting—Cartagena, co-located with the Spanish Navy's submarine flotilla and the Arsenal de Cartagena—facilitates direct coordination with operational naval stakeholders during sea trials. The consortium proposes a dual-use access track within the hub's open-call mechanism, structured to admit defence-oriented innovators at defined TRL entry points, with shared instrumentation, data protocols, and regulatory support provided by CTN and the regional port authority.

Palabras clave: WEC, TEC, Hydrodynamic testing, USV/AUV, Dual-use, CFD, Naval testbed.

6.4
Vehículos marinos no tripulados

40 – SWATSHOAL: un enfoque de sistema-de-sistemas para operaciones colaborativas de enjambres submarinos

Autores: Facio Valero, Aitor[1]; Fuentes Landi, Germán Santos[1]; Ruíz Martínez, Natalia[1]; Rodríguez Piñeiro, Raquel[1]

Resumen. El proyecto SWATSHOAL, financiado por el European Defence Fund (EDF) bajo el acuerdo EDF-2022-RA-UWW-SWAT-SHOAL, constituye una de las iniciativas más ambiciosas en el ámbito de la robótica submarina colaborativa dentro del panorama europeo de defensa. Su objetivo principal es el desarrollo de un sistema de sistemas (SoS) capaz de coordinar de forma eficiente vehículos tripulados y no tripulados –incluyendo UUV, USV y plataformas auxiliares— operando conjuntamente como un enjambre inteligente para misiones complejas en entornos subacuáticos. Con un consorcio de más de veinte socios en once países y un horizonte de ejecución que supera los tres años, el proyecto aspira a sentar las bases tecnológicas, operativas y éticas de la próxima generación de operaciones submarinas colaborativas. SWATSHOAL se articula en torno a un conjunto de paquetes de trabajo que abordan los retos clave de interoperabilidad, coordinación, interacción humano-máquina, evaluación de plataformas e integración en arquitectura C2. Entre los ejes tecnológicos

[1] Navantia.

destaca el desarrollo de capacidades avanzadas de gestión de misión, incorporando algoritmos de cooperación multivehículo, optimización de rutas, fusión de información distribuida y mecanismos adaptativos para la toma de decisiones en escenarios de incertidumbre. Estas capacidades buscan dotar al enjambre de autonomía táctica manteniendo siempre el control último en manos del operador humano. Un segundo pilar fundamental es la integración C2/HMI, orientada a garantizar que los operadores pueden supervisar y modular en tiempo real el comportamiento del enjambre. Esta línea incluye estudios de explicabilidad, trazabilidad de decisiones basadas en IA, requisitos éticos y desarrollo de interfaces gráficas que permitan monitorizar todas las fases de la misión. En paralelo, el proyecto explora la comunicación innovadora entre buzos y vehículos submarinos mediante gestos, seguimiento de mirada, visión estereoscópica y realidad aumentada, abriendo la puerta a una interacción robusta y natural incluso en escenarios de baja visibilidad o turbulencia. Asimismo, SWATSHOAL evalúa una amplia variedad de plataformas europeas, estableciendo criterios de selección basados en autonomía, maniobrabilidad, capacidad de carga, versatilidad y potencial de integración en el SoS. Sobre esta base se realizarán adaptaciones específicas para el demostrador final, que culminará en una demostración en mar abierto, prevista para 2026, donde se validarás las capacidades desarrolladas. Financiado por la Unión Europea. No obstante, los puntos de vista y opiniones expresados son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los del Fondo Europeo de Defensa. Ni la Unión Europea ni la autoridad responsable de la concesión de la subvención pueden ser consideradas responsables de los mismos.

Palabras clave: UxV, SoS, Enjambre, Comunicaciones submarinas, EDF.

52 – Plataforma modular *hardware-software* para el despliegue de enjambres de USV en misiones marítimas complejas

Autores: Rodríguez Cortegoso, Julián[1]; Fernández Pérez, Enrique[1]; Vidal Abad, Alejandro[1]; Orjales Saavedra, Félix[1]; Munín Doce, Alicia[1]; Díaz Casás, Vicente[1]

Resumen. En los últimos años, los UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) han experimentado avances significativos que han reducido sus costes y permitido su uso en enjambres coordinados. Sin embargo, los USV (*Unmanned Surface Vehicles*) no han seguido esta evolución, predominando soluciones *ad hoc*. Este trabajo presenta una plataforma integrada que combina un diseño *hardware* estandarizado con una arquitectura *software* modular, con el objetivo de habilitar el despliegue de enjambres de USV coordinados en misiones marítimas complejas como defensa, vigilancia, reconocimiento y protección de infraestructuras críticas. La plataforma *hardware* se basa en un casco compartimentado fabricado mediante impresión 3D, que integra módulos funcionales intercambiables. El módulo central de electrónica y control se encarga de la navegación, las comunicaciones y la coordinación de subsistemas. Este enfoque proporciona flexibilidad para ensayar algoritmos de control en condiciones reales, configuración

[1] Universidade da Coruña, CITENI, Grupo Integrado de Ingeniería.

adaptable a los requisitos de cada misión, escalabilidad mediante la incorporación de nuevos módulos, y reproducibilidad gracias a la estandarización del proceso de fabricación. La reducción de costes resultante facilita la producción y despliegue de múltiples unidades, posibilitando el uso de enjambres de USV coordinados. La plataforma se complementa con una arquitectura *software* modular y flexible, desarrollada y validada en entornos de simulación, capaz de coordinar equipos heterogéneos de vehículos autónomos de forma centralizada como distribuida, adaptándose dinámicamente a las condiciones de comunicación y fallos o pérdidas de vehículos en tiempo real. Implementada sobre ROS2, se estructura en tres niveles: asignación de tareas de alto nivel en función de las capacidades, necesidades, disponibilidad y posición de cada vehículo, planificación de trayectorias, y control de navegación de bajo nivel. Integra capacidades de sensorización para la detección y evasión de obstáculos estáticos y dinámicos, así como replanificación dinámica en tiempo real. Su diseño híbrido centralizado-distribuido garantiza la continuidad de la misión ante pérdidas parciales o totales de comunicación, permitiendo que los agentes operen de forma autónoma y coordinada. La modularidad de la arquitectura facilita además la integración de distintos algoritmos de asignación y planificación, así como su extensión a nuevos tipos de vehículos, misiones y escenarios.

Palabras clave: *Unmanned Surface Vehicles*, USV *swarms*, ROS2 *architecture*, *Modular embedded platform*, *Cooperative mission planning*, *Centralized-distributed control*, *Dynamic re-planning*.

Área 7
PLATAFORMAS AÉREAS

7.2
Energía y propulsión

43 – Diseño y fabricación de una tobera *aerospike* mediante fabricación aditiva

Autores: Jiménez Durán, Francisco[1]; Ruiz-Yherla García, Juan Bautista[1]; Peñalba Luna, Carlos[2]; González Ramón[3]

Resumen. El presente trabajo aborda el diseño, análisis y fabricación de una tobera *aerospike* mediante técnicas de fabricación aditiva, con aplicación directa en sistemas de interceptación Contra-UAV (C-UAS). Las toberas convencionales de geometría fija tipo campana presentan una eficiencia óptima únicamente a una altitud de diseño específica, lo que las hace subóptimas en misiones que atraviesan distintas capas atmosféricas. Frente a esta limitación, la tecnología *aerospike* ofrece una compensación de altitud intrínseca, adaptando el chorro propulsivo a las condiciones de presión ambiente, lo que la convierte en una solución especialmente atractiva para vehículos interceptores de respuesta rápida. El proyecto se estructura en tres fases diferenciadas. En primer lugar, se lleva a cabo el diseño analítico de la geometría de la tobera y su modelado tridimensional en SOLIDWORKS, tomando como base los fundamentos teóricos de la propulsión coheteril. En segundo lugar, se realiza la caracterización aerodinámica mediante simulación CFD (*Computational Fluid Dynamics*),

[1] Escuela Politécnica Superior del Ejército.
[2] Centro de Fabricación de Piezas del Mando de Apoyo Logístico.
[3] Novaindef.

con el objetivo de estudiar sus prestaciones y cuantificar su rendimiento. Los resultados se contrastan directamente con los de una tobera convencional, permitiendo una evaluación comparativa rigurosa de las ventajas que ofrece la geometría *aerospike* en términos de eficiencia propulsiva. En tercer lugar, se procede a la fabricación física del prototipo aplicando tecnologías de manufactura aditiva. Esta elección responde a un doble propósito: por un lado, estudiar la viabilidad económica de este método frente a la fabricación tradicional; por otro, demostrar que la manufactura aditiva permite materializar geometrías de alta complejidad que resultarían difíciles o inviables de conseguir mediante técnicas convencionales. El prototipo se somete posteriormente a ensayos experimentales que permiten correlacionar los resultados numéricos con el comportamiento real. Este trabajo se inscribe en un marco de desarrollo superior: el sistema integral Contra-UAV, cuyo objetivo es proporcionar una capacidad de neutralización eficaz frente a amenazas de drones en distintos escenarios operativos. Un principio rector del sistema es que el interceptor debe tener un coste significativamente inferior al de la amenaza que neutraliza, haciendo económicamente sostenible su empleo operativo. Dentro de este enfoque de bajo coste, la tobera *aerospike* representa el subsistema de propulsión de los vectores interceptores, siendo su rendimiento y viabilidad de producción factores críticos para el éxito del conjunto. La originalidad de la propuesta reside en la confluencia de una geometría de propulsión avanzada con metodologías de fabricación de última generación, aplicadas en específico al ámbito de la defensa C-UAS.

Palabras clave: Tobera *aerospike*, Fabricación aditiva, Sistemas Contra-UAV, Interceptor de bajo coste.

80 – Nueva instalación de ensayo de toberas de aerorreactores de la Universidad Politécnica de Madrid para aplicaciones de defensa

Autores: Velázquez, Ángel[1]; Aguinaco, Gonzalo[1]; Barrero, Antonio[1]; Sastre, Francisco[1]; Sánchez de León, Luis[1]; Villanueva, Rodrigo[2]; Montañes, José Luis[1]

Resumen. La presentación describe la nueva instalación de ensayos de toberas de aerorreactores que la Universidad Politécnica de Madrid ha desarrollado en su campus de TecnoGetafe. Se trata de una instalación de tipo descarga (*Blowdown*) cuyo objetivo es caracterizar el comportamiento fluidodinámico/aerodinámico de prototipos de toberas de motores de avión. El laboratorio consta de una superficie de 300 m^2. El fluido de trabajo (aire) se comprime, se seca, y se almacena en tres depósitos con un total de 90 m^3 a una presión de 15 bar. A partir de ese punto, el aire entra en línea de ensayos cuyo primer componente importante es un medidor de flujo de tipo Coriolis. Otro componente importante es una válvula con control PID que asegura que la descarga del fluido de trabajo alcanza un estado estacionario (con variaciones mínimas de presión) cuya duración

[1] Universidad Politécnica de Madrid.
[2] ITP Aero.

es del orden de medio minuto a un minuto que es la ventana temporal útil donde se pueden realizar las medidas en los prototipos de toberas. Adicionalmente, en la línea de ensayo hay elementos para el remanso y la uniformización del flujo. El tercer elemento importante de la línea de ensayos es una balanza de alta precisión con una arquitectura especialmente diseñada para este proyecto que permite medir fuerzas y momentos con incertidumbres mínimas en las medidas. Por último, se sitúan los prototipos de toberas que se desean caracterizar. El rango de relaciones de presiones (NPR) que se puede ensayar va de 1.8 a 13. El número de Mach a la salida de los prototipos llega a 2.5. En cuanto a la instrumentación, se miden fuerzas, momentos, coeficientes de descarga, presiones y temperaturas, y se visualiza el flujo vía métodos de tipo Schlieren y *Particle Image Velocimetry* (PIV). La caracterización/validación de la instalación se ha realizado utilizando toberas con y sin vectorización de empuje de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) estadounidense. La nuestra es una instalación singular, ya que no existe otra similar en España, y solo unas pocas en Europa. El proyecto ha sido financiado mediante un convenio entre el Ministerio de Defensa y la Universidad Politécnica de Madrid en el marco del programa New Generation Weapon System – Future Combat Air System (NGWS-FCAS).

Palabras clave: Ensayos experimentales, Toberas de aerorreactores, Defensa.

107 – Mejora de la eficiencia de hélices a bajos números de Reynolds mediante el uso de generadores de vórtices

Autores: Domínguez Fernández, Diego[1]; Parra Villarejo, Fernando[1]; López, Deibi[1]; García Gutiérrez, Adrián[1]

Resumen. El presente estudio busca resolver la necesidad de disponer de sistemas de propulsión a hélice más eficientes en situaciones de funcionamiento a bajo número de Reynolds. Estas condiciones de operación se dan típicamente en aeronaves que utilizan motores eléctricos y deben operar en la estratosfera (conocidos como HAPS o pseudosatélites), así como en los vehículos no tripulados de tamaño reducido (o con propulsión distribuida) o, incluso, en las aeronaves destinadas a la exploración de Marte. Cuando se disminuye el Reynolds de operación empeora el comportamiento aerodinámico del perfil: la resistencia aerodinámica crece y el coeficiente de sustentación máximo disminuye. Estos comportamientos están condicionados muy especialmente por la variación que experimenta el punto de transición laminar-turbulento y la aparición de las que se conocen como burbujas de desprendimiento laminar [LSB, por sus siglas en inglés (*Laminar Separation Bubbles*)], ver figura 1, que producen como consecuencia curvas de sustentación no lineales (Anyoji

[1] Universidad de León.

et al., 2014) y una importante cantidad de resistencia (Zhu, Guo y Hou, 2014). Así, se puede plantear el uso de elementos perturbadores de la capa límite (conocidos como generadores de vórtices), capaces de energizarla y forzar una transición a flujo turbulento para evitar la aparición de las LSB. En esta contribución se muestran los resultados de la primera fase del estudio, en la que se realizan múltiples ensayos en túnel aerodinámico con el objetivo de caracterizar de manera adecuada el comportamiento a bajo número de Reynolds (3×10^4-1.5×10^5) de un perfil típicamente utilizado en el diseño de hélices (NACA 4412). A continuación, se han explorado utilizando el mismo túnel aerodinámico diferentes configuraciones de VG capaces de optimizar su rendimiento para, una vez identificada la más prometedora, proceder a plantear el diseño de la hélice.

Palabras clave: Generador de vórtices, Aerodinámica bajo Reynolds, Hélices.

Bibliografía

Anyoji, M. *et al*. (2014). Computational and experimental analysis of a high-performance airfoil under low-Reynolds-number flow condition. *Journal of Aircraft*. 51(6), pp. 1864-1872.

Zhu, X., Guo, Z. y Hou, Z. (2014). Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges. *Progress in aerospace sciences*. N.º 71, pp. 36-53.

113 – Importancia de las condiciones de contorno de cavidades con combustión en la predicción del desarrollo de inestabilidades termoacústicas

Autores: Gómez Miguel, Raquel[1]; Rodríguez Gutiérrez, David[1]

Resumen. Las inestabilidades termoacústicas juegan un papel fundamental en el diseño y la operación de la mayoría de los sistemas de propulsión. Su aparición es a menudo inesperada y sus consecuencias pueden ser críticas. Dichas inestabilidades se producen debido a una interacción constructiva entre la liberación de calor no estacionaria, intrínseca a los procesos de combustión y las ondas de presión, su naturaleza es altamente no lineal, además, las escalas espaciotemporales involucradas son muy diversas, desde las escalas acústicas hasta las fluidomecánicas. Por ello, la correcta resolución numérica de este tipo de problemas es todavía un gran desafío, ya que se requieren resultados de gran precisión para su correcta predicción. En la literatura, se pueden encontrar numerosos estudios fundamentales sobre propagación de llamas confinadas, donde se utiliza de forma extensiva la aproximación de truncar el dominio computacional en la salida de la cavidad o cámara de combustión. Esta aproximación obvia completamente la complejidad de los fenómenos que

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

ocurren aguas abajo. El objetivo del presente trabajo es mostrar que el desacoplamiento entre el flujo interior (aguas arriba) y el flujo exterior (aguas abajo), que se produce truncando el dominio, proporciona unos resultados que varían notablemente respecto a las soluciones obtenidas sin truncar el dominio, es decir, permitiendo que el fluido descargue a la atmósfera. Para ello, se resuelve el problema de la dinámica de propagación de llamas en una cavidad semiabierta. Dicha cavidad se encuentra en un inicio llena con una mezcla de combustible-aire en reposo, en el instante inicial se deposita calor localmente en el extremo abierto de la misma. Cuando se alcanza la energía de activación de la mezcla reactiva, se inicia un proceso de combustión autosostenido, consumiendo los reactivos y acelerando los productos por expansión térmica, los cuales son expulsados al exterior mediante un chorro caliente. El problema se resuelve usando la configuración tradicional: dominio truncado (DT) y la configuración propuesta: dominio extendido con descarga a la atmósfera (DX). Los resultados permiten evaluar la influencia de los fenómenos que se producen aguas abajo en el desarrollo de las inestabilidades termoacústicas y ponen en evidencia la influencia y la precisión de las condiciones de contorno en la dinámica del proceso.

Palabras clave: Inestabilidades termoacústicas, Combustión, Interacción flujos internos y externos.

129 – Análisis de sensibilidad de la combustión en motores diésel de cuatro tiempos con mezclas diésel-hidrógeno y diésel-metanol

Autores: Albaladejo-Hernández, Daniel[1]; Martinez Escondrillas, Javier[1]; Orellana-Cabero, William Steven[1]; Vera-García, Francisco[2]

Resumen. La transición energética en sistemas de propulsión exige herramientas de modelado capaces de anticipar el efecto de nuevos combustibles sobre la combustión y el rendimiento de motores alternativos. En este contexto, el presente trabajo propone una metodología para analizar el comportamiento de motores térmicos de cuatro tiempos mediante modelos físicos orientados a la caracterización de la combustión a partir de la derivada de la fracción de masa quemada (DFQL), parámetro clave para describir la velocidad de liberación de energía y la evolución del proceso de combustión. La propuesta parte de un motor diésel de referencia y plantea un análisis de sensibilidad comparativo entre su combustión convencional y distintos escenarios de sustitución parcial de combustible mediante mezclas con hidrógeno y metanol. El objetivo principal es identificar cómo varía la forma, amplitud, fase y concentración temporal

[1] Navantia.
[2] Universidad Politécnica de Cartagena.

de la DFQL al modificar la composición del combustible, evaluando su impacto sobre indicadores representativos como el inicio de combustión, la rapidez de combustión y la estabilidad global del ciclo. Este planteamiento se apoya en la literatura reciente sobre modelado de combustión mediante funciones Wiebe simples, dobles y multietapa, especialmente en trabajos que han demostrado su utilidad para reproducir la liberación de calor en combustiones diésel complejas y de doble combustible. Asimismo, estudios previos han mostrado que la incorporación de metanol puede modificar la presión en cilindro, la tasa de liberación de calor y determinadas emisiones, mientras que la adición de hidrógeno acelera la combustión y altera el reparto energético entre fases, lo que justifica un enfoque específico de sensibilidad sobre la DFQL. Como contribución, este trabajo pretende establecer una base metodológica para futuras estrategias de calibración, predicción y control de motores alimentados con combustibles alternativos, facilitando la integración de modelos físico-interpretables en entornos de simulación y apoyo a la decisión. De este modo, la investigación no solo permitirá comparar combustibles desde el punto de vista termo-fluidodinámico, sino también avanzar hacia modelos híbridos más robustos para aplicaciones industriales y de defensa, en continuidad con líneas previas de modelado basado en conocimiento ya difundidas en foros especializados.

Palabras clave: Transición energética, Combustión, Motores diésel, Combustibles alternativos, DFQL, Wiebe.

214 – Estudio de autoignición en capas de mezcla supersónicas H2-Aire para motores SCRamjet

Autores: García Heredero, Miguel[1]; Huete Ruiz de Lira, César[2]; Hermida Quesada, José[3]

Resumen. La autoignición en capas de mezcla aire-combustible constituye un fenómeno de especial interés dentro del estudio de la combustión supersónica, ya que determina en gran medida la aparición, localización y estabilización de la llama en regímenes caracterizados por tiempos de residencia muy reducidos, intensos gradientes térmicos y fuertes variaciones de composición. Su comprensión resulta fundamental en configuraciones de interés para motores SCRamjet, donde el encendido y la estabilización de la combustión en condiciones supersónicas, condicionan de manera decisiva el rendimiento y desempeño del motor. En este contexto, el trabajo propuesto se centra en el análisis teórico y numérico de una capa de mezcla compresible formada entre corrientes de aire e hidrógeno, con especial atención a los mecanismos físicos que gobiernan la ignición y la estructura de llama bajo diferentes condiciones de velocidad, presión y temperatura. Una parte esencial del estudio se ha dedicado

[1] Universidad Carlos III de Madrid.
[2] Universidad Carlos III de Madrid, Dpto. Ingeniería Térmica y de Fluidos (UC3M).
[3] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Propulsión química.

a la formulación del problema y al análisis del papel que desempeñan las propiedades de transporte multicomponente, incluyendo efectos cruzados como Soret y Dufour, en la redistribución de especies y temperatura. Este enfoque permite estudiar con mayor detalle cómo variaciones en la mezcla, en el transporte o en el estado termodinámico pueden modificar de forma apreciable la estructura térmica y composición del flujo y, en consecuencia, la localización de la ignición. El trabajo incluye, además, el análisis de la sensibilidad de la autoignición a distintas condiciones de operación y perturbaciones del campo fluido. En particular, se estudia cómo la presencia de gradientes longitudinales de presión, análogos a los inducidos por compresiones o expansiones del flujo, pueden adelantar o retrasar la ignición, así como alterar la estructura de llama observada. En conjunto, el estudio se sitúa entre la mecánica de fluidos, la combustión y la propulsión hipersónica, y busca contribuir a una mejor comprensión de los mecanismos que controlan la ignición en configuraciones relevantes para la combustión supersónica en motores SCRamjet. Se trata, por tanto, de un tema de gran relevancia actual, alineándose con el apartado 7.2, Energía y Propulsión, de este DESEi+d 2026. Este trabajo se desarrolla, además, como una colaboración entre la Universidad Carlos III de Madrid y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

Palabras clave: Capa de mezcla, Combustión supersónica, SCRamjet, Combustión Hidrógeno-Aire, Autoignición.

7.3
Sistemas integrados en plataformas aéreas

19 – Análisis de la operativa de helicópteros militares en plataformas navales *offshore*

Autores: Matías García, Juan Carlos[1]; Barroso Bardera, Estela[1]; Fernández Antón, Jaime[1]; Bardera, Rafael[1]

Resumen. El presente trabajo analiza operaciones aéreas de helicópteros en entornos navales, centrándose en el uso de helicópteros como una herramienta esencial para el transporte de tropas de manera ágil entre la tierra firme y las estructuras *offshore*. En el sector energético y de defensa, la seguridad es clave y el helicóptero es la vía más rápida de evacuación para una situación de emergencia en una plataforma marítima. Sin embargo, el uso de helicópteros para este propósito no es sencillo. Las plataformas petrolíferas, debido a su compleja geometría industrial, compuesta por torres de perforación, módulos de habitabilidad, grúas y sistemas de escape, actúan como grandes obstáculos ante el viento incidente. Esto genera un entorno aerodinámico complejo, caracterizado por zonas de flujo turbulento, desprendimientos de corriente e intensas fluctuaciones de velocidad que afectan a la seguridad durante la aproximación del helicóptero a la plataforma. La presente investigación se centra en el análisis del entorno aerodinámico de una plataforma petrolífera genérica. Adicionalmente, se utiliza como modelo de referencia un helicóptero de transporte táctico de alto rendimiento (NH-90), para evaluar la trayectoria

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

de aproximación a la plataforma. Todo ello orientado a mejorar la comprensión del problema aerodinámico y mitigar los riesgos inherentes a la maniobra.

Palabras clave: Operaciones *offshore*, Aerodinámica, Seguridad operacional.

7.4
UAS

70 – Desarrollo integral y validación de sistemas de control y guiado para UAV basados en MPC: desde la simulación hasta su implementación embarcada en aplicaciones C-UAS

Autores: Gallardo Navarro, Manuel Antonio[1]; Ruiz-Yherla García, Juan Bautista[1]

Resumen. El presente trabajo desarrolla y valida un sistema de control y guiado autónomo para vehículos aéreos no tripulados (UAV) basado en control predictivo no lineal (MPC), con aplicación directa en sistemas Contra-UAV (C-UAS). En el contexto actual de proliferación de amenazas aéreas de bajo coste, resulta esencial disponer de soluciones capaces de neutralizarlas de forma eficaz, adaptable y económicamente sostenible. La metodología desarrollada se articula en cuatro bloques principales. En primer lugar, se aborda el modelado de la aeronave, considerando tanto formulaciones dinámicas completas como modelos simplificados de tres grados de libertad, adecuados para su implementación en algoritmos de control en tiempo real. En segundo lugar, se diseña un controlador MPC capaz de anticipar la evolución del sistema mediante la resolución

[1] Escuela Politécnica Superior del Ejército.

de un problema de optimización no lineal sujeto a restricciones dinámicas y operativas. En tercer lugar, se implementa el algoritmo empleando el *framework* CasADi junto con el *solver* IPOPT, integrando restricciones relevantes como limitaciones cinemáticas, evitación de obstáculos y condiciones de visibilidad asociadas a sistemas embarcados. Finalmente, se lleva a cabo la validación del sistema en distintos entornos de simulación. Como principal aportación innovadora, se propone una arquitectura de guiado modular concebida como una «caja negra» multipropósito, capaz de adaptarse a distintas plataformas UAV y perfiles de misión sin necesidad de modificar su estructura interna. Esta característica resulta especialmente relevante en aplicaciones C-UAS, donde la flexibilidad, escalabilidad y rapidez de despliegue son factores críticos. El sistema ha sido validado en múltiples escenarios, incluyendo entornos tridimensionales con objetivos dinámicos, obstáculos y situaciones de redirección en tiempo real. Asimismo, se ha extendido el estudio a plataformas tipo «loitering munition», incorporando modelos tridimensionales más representativos de condiciones operativas. El desarrollo se orienta además a su futura validación experimental en vuelo, constituyendo una base sólida para su integración en sistemas reales. Finalmente, se aborda la transición desde el entorno de simulación en MATLAB hacia su implementación en sistemas embarcados de bajo coste, estableciendo una arquitectura compatible con plataformas como Raspberry Pi y definiendo una estrategia de migración a C++ para aplicaciones en tiempo real. La propuesta desarrollada contribuye al avance de sistemas C-UAS de nueva generación, dotando al interceptor de una capacidad de guiado autónomo basada en anticipación, decisión y adaptación en entornos operativos complejos.

Palabras clave: Vehículos aéreos no tripulados (UAV), *Model Predictive Control* (MPC), Sistemas Contra-UAV (C-UAS), Guiado autónomo, Optimización en tiempo real, Arquitectura de guiado modular, Simulación en MATLAB/Simulink.

102 – Desarrollo de un entorno de misiones colaborativas multi-UAV aplicadas a la extinción de incendios

Autores: Cedeño Freire, Ricardo Josué[1]; Méndez Velasquez, Sebastián Camilo[1]; Calomarde, Ignacio[1]

Resumen. El progreso en misiones colaborativas multi-UAV se presenta como un punto de gran interés en un contexto en el que se busca realizar misiones cada vez más complejas, como es el caso de la extinción de incendios forestales. En este contexto, el objetivo es aumentar la autonomía de misión colaborativa (CMA), permitiendo a un equipo heterogéneo de UAV colaborar en una misión de extinción de incendios con una supervisión humana mínima. El presente trabajo parte de una separación clara entre el control de vuelo, realizado en un ordenador de control de vuelo (FCC), y la lógica de misión, gestionada en un ordenador de control de misión (MCC) embarcado en cada UAV. De esta manera, el MCC determina el comportamiento deseado del UAV dentro de la misión, incluyendo las maniobras y acciones específicas necesarias para completarla, y las traduce en comandos genéricos de alto nivel para el FCC, que es el encargado de ejecutarlos. Este enfoque permite reutilizar sistemas de control de vuelo existentes, facilitando el desarrollo de nuevas misiones

[1] UAV Navigation, Grupo Oesía S. L. U.

mediante la adaptación de la lógica de la misión. El comportamiento de cada UAV depende de su rol, la fase de la misión y la información intercambiada con el resto del equipo. El uso del MCC permite gestionar las acciones a realizar en cada momento de la misión y comunicar información clave, como posiciones de objetivos o notificaciones que otros UAV pueden utilizar para definir su comportamiento. La extinción de incendios es una misión de gran complejidad que implica diversas acciones. El sistema presentado permite repartir los distintos objetivos de la misión en roles, tales como búsqueda, monitorización y extinción, utilizando plataformas específicas para cada tarea. Los resultados que se han obtenido en simuladores completos *software in the loop* (SIL) demuestran la capacidad del sistema para coordinar de manera autónoma la actuación conjunta de los UAV, gestionando la comunicación y ejecutando maniobras complejas. El caso presentado ha sido la extinción de incendios forestales, pero la solución propuesta es independiente de la misión y sienta las bases para el desarrollo de sistemas autónomos colaborativos aplicables a otros escenarios que requieran coordinación entre múltiples UAV, como operaciones en el ámbito de la defensa como la detección y neutralización de objetivos o la búsqueda y rescate.

Palabras clave: UAV, Multi, Colaborativo, Misión, Extinción, Incendio, Forestal.

109 – Navegación de UAV en entornos GNSS denegados: diseño y validación operativa de un sistema visual inercial embarcado

Autores: Jiménez Cámara, Pablo[1]; Montes-Grova, Marco A.[1]; Caballero González, Rafael[1]; Perez-Grau, Francisco Javier[1]; Viguria, Antidio[1]

Resumen. La disponibilidad de capacidades de navegación robustas en entornos con GNSS denegado o degradado es un requisito crítico para operaciones UAV en escenarios de defensa, especialmente en zonas hostiles donde el uso de infraestructura externa o comunicaciones auxiliares no puede garantizarse. En este contexto, CATEC ha desarrollado y validado un sistema de navegación visual inercial completamente embarcado, diseñado para proporcionar estimación de posición y orientación relativa de aeronaves no tripuladas sin dependencia de GNSS, mapas previos ni apoyo externo. Esta tecnología ha sido recientemente evaluada en condiciones operativas reales durante la tercera Campaña de Experimentación Táctica 2026 (TEC 3) del Ejército de Tierra, organizada por el Centro de Fuerza Futura 2035 en la Base «Álvarez de Sotomayor» (Viator, Almería). Los resultados obtenidos permiten avanzar en la validación de nuevas capacidades de navegación autónoma en el marco del proceso de transformación tecnológica de las Fuerzas Armadas, consolidando a CATEC

[1] CATEC (Advanced Center for Aerospace Technologies).

como un centro tecnológico de referencia en sistemas autónomos y UAV para el ámbito de la industria de defensa española. El sistema se basa en el uso de una única cámara monocular RGB y una unidad de medida inercial (IMU), ejecutando toda la computación a bordo del UAV. El núcleo del estimador emplea un filtro de Kalman basado en múltiples hipótesis, que mantiene de forma consistente la incertidumbre del estado a lo largo del tiempo. La propagación del estado se realiza mediante integración continua de las medidas inerciales a alta frecuencia. Las actualizaciones se producen a partir del seguimiento de características visuales entre imágenes consecutivas. La arquitectura del sistema se articula mediante un estimador de ventana deslizante que mantiene un conjunto acotado de poses recientes. La marginalización de estados antiguos permite preservar las correlaciones estadísticas como información *a priori*, garantizando consistencia y un coste computacional lineal con el tamaño de la ventana. Esta concepción lo hace especialmente adecuado para plataformas con recursos limitados. La solución ha sido validada en campo a velocidades de hasta 10 m/s y recorridos de hasta 5 km, obteniendo errores acumulados del orden del 2 %, y presenta un formato compacto y ligero que facilita su integración en aeronaves de ala fija y rotatoria. Como línea de evolución, el sistema permite extenderse con capacidades adicionales como detección y seguimiento de objetos de interés a partir de la misma información visual, reforzando su valor operativo en misiones de vigilancia, reconocimiento y apoyo táctico.

Palabras clave: UAS, Navegación sin GNSS, Sistemas autónomos.

116 – Guiado navegación y control para interceptores contra UAS, estrategia y diseño

Autores: Chiclana, Ángel[1]; Calomarde, Ignacio[1]; Milán Cabrera, Francisco[1]; Camiruaga Gojenola, Iker[1]; Donada Rocamora, Enrique[1]

Resumen. La proliferación de amenazas UAS tipo Shahed, con firmas heterogéneas y elevada disponibilidad comercial, demanda capacidades C-UAS que integren adquisición, aproximación y fase terminal con garantías de robustez, trazabilidad y operación segura bajo incertidumbre. Este trabajo presenta el desarrollo de un demostrador C-UAS de extremo a extremo. Orientado a validar en entorno industrial una arquitectura completa de interceptación autónoma supervisada por operador. Se integran funciones de guiado, transición entre localización del objetivo mediante radar externo y guiado interno basado en *seeker* y visualización táctica. La solución combina una fase de aproximación inicial basada en las capacidades de guiado integradas en el Flight Control Computer (FCC), permitiendo establecer un régimen de vuelo de interceptación del objetivo. Una vez alcanzadas condiciones adecuadas de localización por parte del *seeker*, se ejecuta una transición hacia un canal electroóptico (cámara) para la confirmación de la identidad de la amenaza y la fase de guiado terminal. La operación se plantea en modo *human-in-the-loop*: el operador

[1] UAV Navigation, Grupo Oesía S. L. U.

confirma la identidad del blanco y autoriza la activación del modo de ataque final, proporcionando control de riesgos y trazabilidad durante la maniobra. En paralelo, se define una interfaz de comando dedicada en el *software* de Ground Control Station (GCS), junto con mensajes de telemetría y trazas predictivas que facilitan la supervisión de la maniobra y la evaluación del desempeño. El diseño se ha concebido de forma modular para que el sistema pueda integrarse en sistema C2 existentes aumentando su interoperabilidad. La validación se aborda mediante un marco combinado de simulación y ensayos en vuelo con plataformas de prueba, evaluando continuidad de seguimiento, estabilidad del guiado, latencia de comunicaciones y resiliencia ante degradación del entorno (como interferencias o jamming GNSS). La aportación diferencial reside en la integración completa y demostrable (FCC-Control y comando-*payload*) de un flujo C-UAS modular y altamente automatizado ratificando su operabilidad y seguridad.

Palabras clave: UAS, Guiado, Navegación, Control, *Counter*, Intercepción.

118 – Vuelo en formación de UAV: estrategias, desafíos y aplicaciones para operaciones en entornos complejos

Autores: Calomarde, Ignacio[1]; Milán Cabrera, Francisco[1]; Villarrubia de Juan, Alberto[1]; Donada Rocamora, Enrique[1]; Frutos Carro, Miguel Ángel de[1]

Resumen. El vuelo en formación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) representa un avance clave en las operaciones autónomas de defensa y seguridad. Esta capacidad, ya implementada en sistemas como el VECTOR FCS de UAV Navigation – Grupo Oesía, permite que varias aeronaves no tripuladas mantengan posiciones relativas precisas durante el vuelo, operando bajo una lógica de «líder» y «puntos». El líder, ya sea tripulado o no, transmite en tiempo real su información de navegación, permitiendo a los puntos ajustar posición y velocidad para mantener la formación. La posibilidad de operar en formaciones predefinidas, como «cuña» o «ala de combate», aporta ventajas tácticas decisivas en misiones de reconocimiento, penetración o escolta. La definición de zonas de seguridad en torno al líder permite ejecutar maniobras dinámicas ante amenazas o cambios de entorno, manteniendo siempre la integridad de la formación. Esta funcionalidad adquiere especial relevancia en el contexto

[1] UAV Navigation-Grupo Oesía S. L. U.

de iniciativas como el Future Combat Air System (FCAS), que contempla el vuelo coordinado de plataformas tripuladas y UAV tipo Remote Carrier. En este marco, el vuelo en formación se convierte en una capacidad fundamental para operaciones distribuidas, resilientes y cooperativas. La implementación de esta capacidad plantea desafíos tecnológicos relevantes, como la sincronización de trayectorias, la comunicación robusta entre aeronaves y el control autónomo ante fallos. Este trabajo expone los principios de diseño, los retos técnicos y operativos, así como las aplicaciones reales y futuras líneas de investigación, incluyendo entornos GNSS-denegados y operaciones en enjambre. Se incluyen en el apartado de resultados las pruebas realizadas con múltiples UAV realizando formaciones con un UAV y con aeronaves tripuladas. Se analiza la precisión obtenida en las fases de convergencia a formación y de vuelo en formación. Por último, se describe la solución obtenida desde un punto de vista operativo para asegurar la realización segura de esta maniobra en condiciones de vuelo real y las posibles mejoras a futuro.

Palabras clave: UAS, *Manned*, *Unmanned*, *Teaming*, Guiado, Navegación, Control, Vuelo, FCAS.

138 – Estimación de riesgo en tierra para UAS en tiempo cuasirreal mediante modelado eficiente del cono de caída

Autores: Leandres Rovira, Hugo[1]; Martínez, David S.[2]; Avanzini, Giulio[3]; Cantero Obregón, Antonio[4]

Resumen. La operación de sistemas aéreos no tripulados (UAS) en entornos poblados plantea un desafío crítico en términos de seguridad, particularmente en la estimación del área de impacto ante fallos en vuelo. Esta información resulta esencial para la definición de zonas de exclusión, la evaluación del riesgo en tierra y el soporte a la toma de decisiones en contextos operativos de defensa y seguridad. Este trabajo presenta un modelo probabilístico para la caracterización del denominado «cono de caída», basado en la propagación de incertidumbre desde el estado dinámico inicial del dron hasta la distribución espacial del impacto. Frente a los enfoques clásicos basados en simulación Monte Carlo, de elevado coste computacional, se propone una formulación analítica apoyada en la linealización del sistema dinámico mediante su matriz jacobiana.

[1] UPCT – CUD San Javier – ESPOL.
[2] Centro Universitario de la Defensa de San Javier - Academia General del Aire.
[3] Università degli Studi di Roma «La Sapienza».
[4] Escuela Politécnica Superior del Ejército - Ejército de Tierra.

Esta aproximación permite modelar la dispersión en planta como una distribución gaussiana bivariada, obteniendo de forma eficiente elipses de probabilidad asociadas a distintos niveles de confianza. El modelo incorpora dinámica de caída con resistencia aerodinámica anisotrópica y viento tridimensional constante, así como una representación explícita de la incertidumbre en la velocidad inicial del sistema. Adicionalmente, se introduce una envolvente determinista como límite físico-operativo conservador, complementaria a la representación probabilística, con el objetivo de acotar el dominio alcanzable del impacto. La validación se plantea como un contraste cuantitativo frente a simulación Monte Carlo del mismo sistema dinámico no lineal, evaluando la precisión en la posición media de impacto, los semiejes de la elipse de probabilidad y el área asociada. Los resultados obtenidos muestran errores relativos menores al 10-15 % en las magnitudes evaluadas, cumpliendo los criterios de validación definidos y evidenciando una elevada precisión del modelo, junto con una reducción significativa del coste computacional. El diseño experimental contempla además escenarios orientados a delimitar el dominio de validez de la aproximación y caracterizar su comportamiento en regímenes más exigentes. Desde el punto de vista aplicado, el modelo permite integrar estimaciones de riesgo en tiempo casi real en simuladores operativos o sistemas de planificación de misiones, facilitando la evaluación sistemática del riesgo en tierra en escenarios complejos. Su aplicabilidad resulta especialmente relevante en operaciones de seguridad y defensa en entornos urbanos, donde la necesidad de decisiones rápidas y fundamentadas exige modelos físicamente coherentes y computacionalmente eficientes.

Palabras clave: *Ground risk assessment*, *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), *Impact footprint modeling*, *Uncertainty propagation*, *Near real-time risk estimation*.

194 – Determinación de las trayectorias de ascenso de globos estratosféricos para la interceptación de globos espía

Autores: Delgado, Adrián[1]; López, Deibi[1]; García-Gutiérrez, Adrián[1]; Domínguez, Diego[1]

Resumen. La situación geopolítica mundial hace que cada vez aparezcan más amenazas que comprometen la seguridad del espacio aéreo. En este contexto, los sistemas tradicionales se han sustituido o complementado en muchas ocasiones con soluciones más discretas y difíciles de detectar, entre las que destacan los globos espía estratosféricos. Estos dispositivos, capaces de operar durante largos periodos en capas superiores de la atmósfera, ofrecen ventajas tácticas significativas, destacando su potencial en misiones de vigilancia y operaciones de guerra electrónica. Los sistemas de defensa utilizados habitualmente frente a estas amenazas suponen un coste importante a nivel económico y de medios tecnológicos, sobre todo comparado con el que representan los globos espía. Por ello, la utilización de globos estratosféricos interceptores proporciona una solución de bajo coste que permite lidiar con este tipo de situaciones. En este tipo de aplicaciones, predecir con precisión las trayectorias, para así poder determinar el lugar y el momento en que debe realizarse el lanzamiento, se

[1] Universidad de León.

convierten en aspectos clave para el éxito de la misión. En este trabajo, se implementa un algoritmo para determinar las trayectorias de ascenso prevista del globo estratosférico interceptor con el objetivo de que al final del trayecto se encuentre en las inmediaciones del globo espía estratosférico. Para ello, se desarrolla un modelo que integra tanto la dinámica del sistema —descrita mediante las ecuaciones de la mecánica de vuelo— como la caracterización del vehículo, incluyendo aspectos como su dimensionado y un modelo aerodinámico. La otra contribución fundamental es el viento, para lo que se utilizan modelos numéricos de predicción. Debido a su carácter estocástico, cualquier resultado obtenido tiene un cierto grado de incertidumbre que debe tenerse en cuenta para que se cumplan los requisitos de la misión. También se lleva a cabo un análisis probabilístico para garantizar que el globo se sitúe dentro del área de referencia y proporcione la cobertura deseada, estudiando la influencia de las componentes del viento en la trayectoria final. Además, se incorpora la influencia de otros factores ambientales en el vuelo, incluyendo la radiación solar y los principales procesos térmicos. Este modelo se validará en un futuro próximo mediante pruebas experimentales para determinar la precisión y la fidelidad de las soluciones, prestando especial atención a la incertidumbre asociada a las predicciones del viento.

Palabras clave: Globos estratosféricos, Determinación de trayectorias, Predicción del viento, Incertidumbre, Restricciones operacionales.

200 – Implementación de técnicas de fabricación 3D y prototipado de RPAS

Autores: Capellín Millá, Juan Manuel[1]; García Torres, Rafael[2]

Resumen. El conflicto en Ucrania ha evidenciado una profunda transformación en los parámetros de la guerra moderna, especialmente en el empleo intensivo de sistemas aéreos no tripulados. Dentro de este ámbito, los drones FPV (*First Person View*) han adquirido una relevancia creciente por su bajo coste, rapidez de producción, facilidad de adaptación y capacidad para generar efectos tácticos significativos en escenarios operativos cambiantes. El desarrollo y proliferación de estos sistemas ha estado estrechamente vinculado a comunidades de entusiastas, ingenieros civiles y especialistas en *hardware*, que han aplicado ciclos rápidos de diseño, fabricación, prueba, validación y mejora continua. Esta dinámica ha permitido reducir de forma drástica los tiempos de innovación, generando soluciones adaptadas a necesidades concretas del campo de batalla en plazos de días o semanas. En este contexto, la fabricación aditiva mediante tecnologías FDM (*Fused Deposition Modeling*) se ha consolidado como una herramienta clave para el diseño, producción y modificación de componentes de RPAS. Su principal ventaja no reside únicamente en el bajo coste, sino en la flexibilidad que aporta para adaptar plataformas, cargas

[1] Ejército del Aire y del Espacio.
[2] ETRAIR S. L.

útiles, elementos estructurales y piezas de recambio a diferentes perfiles de misión, entornos operativos y restricciones logísticas. La impresión 3D permite obtener geometrías complejas, reducir peso mediante optimización topológica, ajustar configuraciones internas de relleno y espesores de pared y acelerar la disponibilidad de repuestos o prototipos funcionales. Todo ello contribuye a mejorar la autonomía logística de las unidades desplegadas, especialmente en escenarios donde las cadenas de suministro pueden verse degradadas, interrumpidas o sometidas a presión operativa. Asimismo, la fabricación aditiva facilita la modificación de drones comerciales y el desarrollo de RPAS fungibles adaptados a misiones específicas, reforzando la capacidad de respuesta ante nuevas amenazas, contramedidas y necesidades tácticas. Esta capacidad resulta especialmente relevante para unidades que requieren soluciones ágiles, transportables y de rápida implementación en zona de operaciones. En la actualidad, se está impulsando la dotación de capacidades básicas de fabricación aditiva en unidades del Ejército del Aire y del Espacio, como el Escuadrón de Zapadores Paracaidistas (EZAPAC) y el Escuadrón de Apoyo al Despliegue Aéreo (EADA). El objetivo es que estas unidades puedan desplegar células básicas de fabricación, asumir capacidades iniciales de diseño y prototipado, ensamblar y validar modelos funcionales de RPAS fungibles, e incorporar ciclos de transferencia de conocimiento con apoyo de ingeniería por parte de la Maestranza Aérea de Albacete.

Palabras clave: FPV (*First Person View*), *Drone*, Impresión 3D, RPAS.

234 – Diseño de una arquitectura SafeRL multiagente para la escolta de unidades terrestres mediante enjambres de UAV

Autores: Rosario Caponera de Cobellis, Romolo[1]; Torrecilla, Jose S.[2]

Resumen. La guerra de Ucrania ha evidenciado la importancia de las tecnologías que, como los drones, buscan cantidad y bajo coste por encima de la potencia de fuego, reduciendo enormemente la eficacia de medios más tradicionales, como los carros de combate, que, siendo inmensamente más costosos, difícilmente pueden protegerse ante ataques de este tipo. La neutralización de estas amenazas es, de hecho, uno de los principales campos de estudio en la guerra moderna, demostrando que la aparición de estos sistemas ha marcado un punto de inflexión en la táctica militar. Es en este contexto que se propone un sistema de escolta basado en enjambres de drones autónomos para la protección de vehículos o pelotones frente a drones enemigos mediante intercepción aérea. Para ello, se desarrolla una arquitectura de inteligencia artificial basada en técnicas de *Deep Reinforcement Learning* combinado con técnicas de *Control Barrier Functions* (SafeRL) capaces de controlar cada dron del enjambre de modo independiente, sin que haya necesidad de un operador humano,

[1] Escuela Politécnica Superior del Ejército.
[2] Dpto. Ingeniería Química y de Materiales, Universidad Complutense de Madrid.

de una inteligencia central, o de un dron «líder». La ausencia de un dron maestro dota al sistema de flexibilidad absoluta en cuanto al tamaño del enjambre (permitiendo que se desplieguen o retiren drones en cualquier momento), haciéndolo resiliente ante la pérdida o inhibición de cualquier unidad. El sistema se entrena utilizando Nvidia IsaacLab y el simulador IsaacSim, reconocido en la industria de la robótica por permitir paralelismo masivo y minimizar el *Sim-to-Real gap* (diferencia entre lo simulado y la realidad), garantizando una alta transferencia al mundo real. Los métodos tradicionales de control de enjambres, como el APF (*Artificial Potential Field*), cuentan con errores conocidos de mínimos locales. Este trabajo presenta la primera fase de una alternativa a estos algoritmos que promete resolver los errores matemáticos mediante inteligencia computacional en entornos complejos, maximizando el rendimiento y la eficacia de los sistemas multiagente basados en enjambres. Se realiza, por ello, una comparativa de rendimiento entre métodos clásicos de control y el algoritmo MARL presentado.

Palabras clave: *Artificial Intelligence*, *Reinforcement Learning*, UAV, *Drone*, IsaacLab.

283 – Estudio experimental de configuraciones bioinspiradas para RPAS a bajo Reynolds

Autores: Barroso Barderas, Estela[1]; Bardera, Rafael[1]; Matias García, Juan Carlos[1]; Fernández Antón, Jaime[1]; Rodriguez-Sevillano, Ángel Antonio[2]

Resumen. Los vehículos aéreos no tripulados de pequeño tamaño, RPAS, constituyen una herramienta de creciente interés en el ámbito de la defensa y la seguridad nacional. Su capacidad para operar en misiones de vigilancia, reconocimiento, control de fronteras, apoyo en emergencias o intervención en entornos peligrosos permite reducir el riesgo para el personal y ampliar las capacidades operativas en escenarios complejos. No obstante, debido a sus reducidas dimensiones y a sus bajas velocidades de operación, estos vehículos suelen volar en regímenes de bajo número de Reynolds, donde las prestaciones aerodinámicas pueden verse penalizadas de forma significativa. En este contexto, el presente estudio aborda la mejora de la eficiencia aerodinámica de RPAS de ala fija mediante el empleo de configuraciones bioinspiradas. En particular, se analizan diseños innovadores de alas cuya forma en planta se inspira en la morfología de animales voladores, como el murciélago y la gaviota, con el objetivo

[1] INTA.
[2] Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

de evaluar su potencial para mejorar las características aerodinámicas en condiciones de crucero. Estas geometrías no convencionales podrían ofrecer ventajas en términos de sustentación, resistencia aerodinámica y eficiencia aerodinámica global frente a configuraciones de alas convencionales empleadas en vehículos de pequeño tamaño. Para ello, se diseñan, fabrican y ensayan experimentalmente distintos modelos de alas en INTA. Los modelos se fabrican mediante impresión 3D, lo que permite obtener geometrías complejas con bajo coste, buen acabado superficial y tiempos de producción reducidos. Dado que los RPAS objeto de estudio presentan dimensiones características del orden de 500 mm, los ensayos se realizan a escala real. Los ensayos experimentales se llevan a cabo en un túnel de viento de baja velocidad, considerando una velocidad de operación de 10 m/s, representativa de las condiciones habituales de vuelo de este tipo de vehículos. Los modelos se ensayan para un amplio rango de ángulos de ataque, con el fin de cubrir diferentes condiciones de vuelo, desde régimen de crucero hasta situaciones próximas a la entrada en pérdida. Las fuerzas aerodinámicas se miden mediante una balanza externa de dos componentes, obteniéndose los coeficientes de sustentación y resistencia aerodinámica, así como la eficiencia aerodinámica de cada configuración. Los resultados experimentales permitirán comparar el comportamiento de las alas bioinspiradas y valorar su aplicabilidad en futuros modelos de RPAS de uso dual orientados a misiones de defensa y seguridad.

Palabras clave: RPAS, Configuraciones bioinspiradas, Resistencia aerodinámica, Túnel de viento, Medidas experimentales.

Área 8
SISTEMAS ESPACIALES

8.2
Comunicaciones SATCOM

45 – Comunicaciones tácticas UHF desde constelaciones LEO

Autores: Lorenzo, Pablo[1]; Díez, Jacobo[1]; Alonso, Eduardo[1]

Resumen. Comunicaciones seguras/resilientes/críticas para Defensa, emergencias, rescate, ayuda humanitaria, seguridad pública, seguridad marítima, seguridad de infraestructuras críticas, operaciones científicas y diplomáticas.

El presente trabajo se enmarca en el desarrollo de una forma de onda innovadora para comunicaciones tácticas de voz vía satélite (UHF LEO SATCOM). El objetivo principal es optimizar el segmento espacial y aumentar la disponibilidad del enlace en escenarios tácticos. Para ello, se diseña una arquitectura la cual reduce la velocidad binaria, se utilizan modulaciones FSK eficientes en el uso de la potencia, y antenas de haz conformado para no requerir apuntamiento. Esto se logra mediante el uso de la tecnología de compresión armónica sinusoidal del *vocoder* de código abierto. Reducir la tasa de bit proporciona una mejora fundamental en la relación señal a ruido (SNR), garantizando el cierre del balance de enlace incluso en ángulos de muy baja elevación. En el proyecto, se manifiesta la capacidad de la carga útil para operar en tres configuraciones: traslación directa de frecuencia (*bend-pipe*), regeneración a bordo (demodulación

[1] Hydra Space.

y corrección de errores) para tráfico en tiempo real dentro de la huella, y almacenamiento y retransmisión diferida (*store-and-forward*) sobre zonas geográficas designadas. Asimismo, el sistema corrige de forma autónoma la desviación Doppler en el enlace descendente y admite la reutilización de terminales terrestres comerciales. Desde la perspectiva estratégica militar, el trabajo destaca por su concepción como tecnología de doble uso. Se propone un robusto esquema de ciberseguridad centrado en la autenticación de dispositivos y encriptación de las comunicaciones mediante algoritmos resistentes a ataques cuánticos. El diseño contempla operar en el espectro asignado a defensa, junto con la previsión técnica para emplear saltos de frecuencia (*frequency hopping*) y conformación de haces espaciales (*beamforming*), dotando a las comunicaciones de una alta inmunidad a interferencias intencionadas.

Palabras clave: UHF, LEO SATCOM, FSK, SNR, *Frequency Hopping*, *Beamforming*.

119 – Diseño, desarrollo y escalado industrial de antenas activas reconfigurables multihaz de segmento espacial para comunicaciones seguras en constelaciones LEO

Autores: Cano, Francisco[1]; Melendro, Javier[1]; Ortega, Sonia[1]; Lobato, Víctor[1]; Gualo, Aurelio[1]; Echeveste, Jose Ignacio[1]; Lucena, Carlos[1]; Baldominos, Alejandro[1]; Peña, David[1]; Garvía, Alberto[1]; Granell, Enrigue[1]; García, Vicente[1]; Montesano, Antonio[1]; Perán, Francisco[1]; Bedia, Beatriz[2]; Castro, Adrian[2]; Moreno, Carlos[2]; Mayol, Francisco[2]; Paco, Pedro de[3]; García, Alejandro[4]; Almorox, Pablo[4]; Calero, Ibai[5]; Astibia, Alejandro[5]; Teberio, Fernando[5]; Jiménez, Javier[5]; González, Miguel[6]; Svikovic, Vladimir[6]

Resumen. La industria espacial atraviesa una transformación radical impulsada por el paradigma del *New Space*, caracterizado por la entrada de nuevos actores privados, una innovación ágil y el despliegue masivo de constelaciones de satélites en órbita terrestre baja (LEO). En este

[1] Airbus Defence and Space.
[2] Sener TAFS.
[3] Universidad Autónoma de Barcelona.
[4] Televés.
[5] Anteral.
[6] Thales Alenia Space.

contexto, la soberanía digital y la seguridad estratégica se han convertido en prioridades fundamentales para la Unión Europea. Iniciativas como el programa IRIS² y GOVSATCOM subrayan la necesidad crítica de contar con infraestructuras satelitales de comunicaciones soberanas, fiables y con capacidades avanzadas como geolocalización y mitigación de señales interferentes, esenciales tanto para servicios gubernamentales como para sistemas de defensa avanzados, incluyendo el Futuro Sistema Aéreo de Combate (FCAS). El éxito de estos sistemas de comunicaciones de nueva generación depende en gran medida de la flexibilidad de sus cargas de pago. En este escenario, las antenas activas emergen como la tecnología habilitadora clave, permitiendo una gestión dinámica de los recursos en entornos altamente variables. Gracias a su capacidad de reconfiguración mediante *software*, estas antenas facilitan la adaptación de coberturas, la redistribución de ancho de banda y potencia, y la implementación de esquemas de *beam-hopping* para la multiplexación temporal. Asimismo, garantizan la continuidad de los enlaces usuario-satélite mediante un apuntamiento dinámico y procesos de *hand-over* eficientes, elementos indispensables para el despliegue de redes 5G NTN (*Non-Terrestrial Networks*). Este artículo detalla el diseño y desarrollo tanto de las tecnologías críticas como de la arquitectura de una nueva generación de antenas activas orientadas al mercado de constelaciones. Partiendo del legado tecnológico de sistemas desarrollados en España para satélites geoestacionarios (GEO) —como las antenas activas de Spainsat NG— el trabajo aborda la evolución hacia los exigentes requisitos de las constelaciones LEO. El enfoque no es únicamente técnico, sino que integra una fuerte vertiente industrial dirigida a optimizar el diseño para la producción en masa, reducir los tiempos de entrega y minimizar los costes recurrentes. En conclusión, esta propuesta busca posicionar la capacidad industrial nacional a la vanguardia de las comunicaciones seguras, respondiendo a la demanda global de conectividad universal bajo estándares de alta seguridad y eficiencia operativa.

Palabras clave: *New Space*, Antenas activas, Constelaciones LEO, Comunicaciones seguras, IRIS2, Satélites, Reconfigurabilidad, Producción en masa, Amplificadores, *Beamforming*.

237 – Integración de antenas conformables impresas y embebidas en estructuras de material compuesto para vehículos aéreos autónomos de defensa

Autores: Fontdecaba, Enric[1]; Casellas, Cristina[1]

Resumen. El desarrollo de vehículos aéreos autónomos para aplicaciones de defensa está impulsando la integración funcional de subsistemas con el objetivo de reducir masa, volumen y complejidad, al tiempo que se mejora la robustez y eficiencia global de la plataforma. En este contexto, la integración de sistemas radiantes directamente en estructuras de material compuesto representa una vía prometedora para superar las limitaciones asociadas a las soluciones convencionales basadas en antenas externas o subsistemas independientes. Las arquitecturas tradicionales de integración de antenas suelen requerir piezas específicas, radomos dedicados y operaciones de ensamblaje adicionales, lo que implica incrementos de peso, penalizaciones aerodinámicas y una mayor complejidad de montaje y mantenimiento. Frente a ello, la integración de antenas impresas y embebidas en piezas de *composite* permite eliminar componentes adicionales y aprovechar el propio elemento estructural como soporte funcional

[1] EURECAT.

del sistema radiante. Hasta el momento, diversas soluciones han demostrado la viabilidad de integrar antenas impresas en materiales compuestos, por lo general limitadas a geometrías en esencia planas. Sin embargo, este enfoque no explota plenamente el potencial de las formas tridimensionales propias de las estructuras aeronáuticas. El desarrollo de procesos de fabricación que permitan conformar circuitos y antenas en tres dimensiones supone un avance relevante en la integración multifuncional de estructuras. El enfoque tecnológico considerado se basa en la integración de circuitos impresos combinados, cuando es necesario, con procesos de metalización para alcanzar las prestaciones eléctricas requeridas. Estos elementos se embeben en el laminado durante el proceso de fabricación del *composite*, resultando compatibles con tecnologías de molde cerrado y procesos industriales repetitivos. El resultado es una antena integrada, protegida del entorno y geométricamente adaptada a la superficie real de la estructura. La capacidad de conformar antenas en 3D aporta beneficios significativos. En primer lugar, elimina la necesidad de piezas dedicadas, reduciendo masa, número de componentes y operaciones de montaje. En segundo lugar, permite utilizar la forma de la propia estructura para mejorar el comportamiento electromagnético, optimizando la orientación y el acoplamiento del sistema radiante sin aumentar la complejidad del conjunto. Adicionalmente, la integración embebida contribuye a una mayor robustez del sistema y a una menor exposición de los elementos radiantes, aspectos de especial interés en aplicaciones de defensa. Las primeras integraciones realizadas validan la viabilidad del concepto y ponen de relieve su potencial como tecnología habilitadora para plataformas aéreas más compactas, eficientes y multifuncionales. En conjunto, la integración de antenas conformables en materiales compuestos se posiciona como una vía relevante para el desarrollo de futuras arquitecturas de vehículos aéreos autónomos en defensa.

Palabras clave: Antenas integradas, Materiales compuestos, Antenas conformables, Vehículos aéreos.

251 – Arquitectura criptoágil para comunicaciones satelitales seguras: integración de criptografía poscuántica y distribución cuántica de claves en entornos de Defensa

Autores: Bas, Joan[1]; Compte, Albert[1]; Sliwa, Joanna[2]; Wrona, Konrad[2]

Resumen. La evolución de la computación cuántica plantea una amenaza crítica para los sistemas criptográficos clásicos utilizados en comunicaciones satelitales y redes de Defensa. La futura capacidad de los ordenadores cuánticos para comprometer algoritmos ampliamente desplegados, como RSA o ECC, exige una transición progresiva hacia arquitecturas resilientes que garanticen la seguridad de la información a largo plazo en entornos de misión crítica. En este contexto, se propone una arquitectura de seguridad para sistemas SATCOM basada en un enfoque PQC-primero, donde la criptografía poscuántica (PQC) constituye el núcleo del sistema, complementada opcionalmente mediante distribución cuántica de claves (QKD) como mecanismo avanzado de provisión de material criptográfico. Este enfoque permite mantener la interoperabilidad con estándares internacionales emergentes y asegurar la continuidad operativa durante el proceso de migración. En particular, QKD se integra como un servicio

[1] CTTC.
[2] NCIA.

externo de generación de claves dentro de esquemas híbridos y criptoágiles, sin sustituir la base PQC. El trabajo ha sido desarrollado en el marco de una colaboración internacional entre la NATO Communications and Information Agency (NCIA) y el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), dentro del grupo NATO STO IST-219, centrado en comunicaciones seguras y resilientes. La metodología combina el análisis del estado del arte y de los procesos de estandarización internacionales, el diseño de arquitecturas interoperables y la evaluación de viabilidad en escenarios operativos de comunicaciones satelitales. Asimismo, se plantean modelos de migración que consideran la coexistencia de tecnologías, la segmentación entre componentes espaciales y terrestres y las restricciones propias de entornos de misión crítica. Como principales resultados, se define una arquitectura de referencia para comunicaciones satelitales seguras frente a amenazas cuánticas, junto con un modelo de evaluación técnico-operacional y un conjunto de directrices para la transición progresiva hacia infraestructuras resilientes. Estas contribuciones permiten mejorar la criptoagilidad, la gestión de claves y la resiliencia de los sistemas de información, reforzando la seguridad en aplicaciones de Defensa y la protección de infraestructuras críticas.

Palabras clave: Integración PQC con QKD, Comunicaciones seguras satelitales, Arquitecturas seguras, Criptoagilidad, Resiliencia.

252 – Hacia unas comunicaciones militares por satélite resilientes frente a la computación cuántica: corrección adaptativa de errores para QKD satelital sobre enlaces de conexión ópticos en espacio libre

Autores: Prades, Albert Compte[1]; Bas, Joan[1]

Resumen. Durante la última década se han propuesto diversos enfoques para garantizar comunicaciones militares por satélite (SATCOM) resilientes frente a la computación cuántica ante la amenaza «harvest-now, decrypt-later» sobre la criptografía clásica de clave pública. Estas estrategias incluyen la adopción de criptografía poscuántica (PQC) y la distribución cuántica de claves vía satélite (SatQKD) como fuente de claves simétricas de alta garantía. Aunque la PQC se considere ampliamente la solución base para despliegues seguros, la viabilidad de SatQKD sigue siendo objeto de debate debido a las limitaciones tecnológicas actuales. En particular, la naturaleza ruidosa, variante en el tiempo y turbulenta de los enlaces ópticos en espacio libre (FSO) entre satélites y estaciones ópticas terrestres (OGS) dificulta la integración fiable de QKD en sistemas SATCOM militares, especialmente en la entrega oportuna y segura

[1] CTTC.

del material criptográfico. Este trabajo aborda estos retos mediante la propuesta de nuevos métodos de corrección de errores directa (*forward error correction*). El estudio evalúa distintos algoritmos de decodificación bajo condiciones realistas de FSO/QKD mediante simulación Monte Carlo del enlace de conexión (*feeder link*). El modelo incorpora las principales degradaciones físicas, entre ellas, turbulencia/centelleo, desplazamiento Doppler, deriva del haz, errores de apuntamiento y pérdidas en los fotodetectores. Se analizan variantes de decodificadores de códigos de baja densidad de paridad (LDPC), incluyendo técnicas basadas en inteligencia artificial para mejorar la ecualización del canal, como redes neuronales *feed-forward*, métodos basados en grafos y enfoques de aprendizaje por refuerzo, así como códigos conscientes de la degeneración (*degeneracy-aware codes*). Este trabajo se desarrolla en colaboración internacional entre la NATO Communications and Information Agency (NCIA) y el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) dentro del grupo NATO STO IST-219 sobre comunicaciones seguras y resilientes. La metodología combina evaluación del estado del arte en esquemas de codificación clásicos y cuánticos con restricciones operativas, considerando tanto la capacidad de corrección de errores como la latencia de decodificación. Asimismo, incorpora estrategias de codificación adaptativas según el escenario de comunicación. Los principales resultados incluyen una arquitectura de enlace FSO/QKD para comunicaciones por satélite resilientes frente a la computación cuántica, un marco unificado de evaluación para técnicas de corrección de errores clásicas y cuánticas, y un conjunto de estrategias de codificación contextuales. Estas contribuciones mejoran la resiliencia y fiabilidad de las comunicaciones SatQKD, favoreciendo la implementación práctica de sistemas de gestión cuántica de claves para aplicaciones de defensa.

Palabras clave: Comunicaciones militares por satélite, Comunicaciones de defensa, Distribución cuántica de claves, Comunicaciones ópticas en espacio libre, Códigos de baja densidad de paridad (LDPC), Codificación adaptativa, Enlaces de conexión ópticos, Comunicaciones resilientes frente a la computación cuántica, Aprendizaje automático aplicado a las comunicaciones.

8.3
Inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR)

155 – Capacidades SIGINT y monitorización del espectro mediante satélites SDR: validación operativa de la plataforma SATMAR

Autor: Vázquez García, Antonio[1]

Resumen. La creciente saturación del espectro electromagnético representa un desafío crítico tanto para operaciones civiles como de defensa. Las interferencias no intencionadas, el uso indebido del espectro y los episodios de *jamming* afectan cada vez con mayor frecuencia a servicios esenciales, comunicaciones marítimas y sistemas de navegación. Afrontar este escenario requiere capacidades de monitorización persistente y de amplia cobertura que únicamente los activos espaciales pueden proporcionar. Este trabajo presenta las capacidades de monitorización RF y SIGINT de SATMAR, una plataforma de pequeño satélite en órbita diseñada y desarrollada por Alén Space. SATMAR opera en tres bandas de frecuencia (VHF marítima, banda S y banda L), lo que permite la observación de un amplio conjunto de señales de interés. En el núcleo de la carga útil, se encuentra TREVO, una avanzada radio definida por *software* (SDR), también desarrollada por Alén Space, que proporciona capacidades flexibles de captura y procesado de señal a bordo, con alta

[1] Alén Space.

fidelidad y gran adaptabilidad a distintas formas de onda y configuraciones de frecuencia. Las señales captadas son posteriormente explotadas tanto a bordo como en segmento terreno, donde ya se ha demostrado con éxito la demodulación y decodificación de tramas AIS Long Range, así como de comunicaciones de voz en VHF marítima, incluyendo el Canal 16 (canal internacional de socorro y llamada marítima). Estos resultados validan la cadena completa, desde la adquisición de señal desde el espacio hasta la generación de inteligencia. Más allá de la explotación de señales, este trabajo aborda técnicas de detección de interferencias y métodos de geolocalización susceptibles de ser implementados mediante pequeños satélites. La capacidad de localizar con precisión fuentes interferentes desde órbita constituye una capacidad clave para la gestión del espectro y el conocimiento situacional en entornos disputados. Las bases técnicas establecidas a través de SATMAR –captura SDR a bordo, cobertura multibanda y explotación de señales– proporcionan un punto de partida sólido para futuras evoluciones. En esta línea, el trabajo contribuye a la hoja de ruta para el desarrollo de una carga útil avanzada de monitorización RF y SIGINT, que incorporará algoritmos avanzados de aprendizaje automático para la clasificación automática de señales, reforzando así la capacidad del sistema para caracterizar de forma autónoma el entorno electromagnético.

Palabras clave: SIGINT, Monitorización RF, Pequeños satélites, Radio definida por *software* (SDR), Geolocalización de señales, Conocimiento situacional (ISR), SATMAR, Seguridad marítima, Gestión del espectro, Aprendizaje automático (*Machine Learning*).

197 – Protección de activos espaciales frente a maniobras de aproximación

Autores: Serrano, Jaime[1]; Gallego, Ángel[1]; Haiyang Ferreiro, Ana[2]

Resumen. El dominio espacial es ya un entorno operativo clave para la defensa, del que dependen capacidades críticas de vigilancia, comunicaciones y apoyo a las operaciones militares a escala global. El control de este dominio exige un conocimiento preciso y continuo de los objetos y actividades que lo conforman, conocido como *Space Domain Awareness* (SDA). En este marco, las *Rendezvous and Proximity Operations* (RPO), realizadas por satélites capaces de aproximarse de forma controlada a otros activos espaciales, representan uno de los principales retos para la seguridad de las misiones. Aunque estas operaciones pueden responder a fines legítimos, numerosos casos recientes evidencian su empleo con objetivos de espionaje, interferencia o sabotaje. Este trabajo presenta un enfoque integral para la detección, caracterización y mitigación de RPO intencionales, mediante la evolución tecnológica de capacidades clásicas de *Space Surveillance and Tracking* (SST) hacia técnicas avanzadas de SDA. Esta sinergia aprovecha las soluciones de detección de aproximaciones y cálculo orbital consolidadas en SST, evolucionándolas en una aplicación dual para SDA, mediante una interpretación del comportamiento,

[1] GMV.
[2] GMV – Universidad Carlos III de Madrid.

intencionalidad y nivel de amenaza de los satélites inspectores a partir de su patrón de vida, maniobras y características operacionales. El estudio se apoya en el análisis detallado de casos reales en régimen orbital GEO y LEO, protagonizados por satélites rusos, estadounidenses y chinos. En GEO, las RPO se caracterizan principalmente por maniobras de reposicionamiento y colocación prolongada en la ventana orbital del objetivo, con aproximaciones que pueden anticiparse varios días si se monitorizan de forma correcta los vecinos orbitales. En LEO, las RPO muestran un comportamiento distinto: aproximaciones periódicas logradas mediante pequeñas diferencias en el semieje mayor y el mantenimiento del mismo plano orbital, permitiendo encuentros repetidos con velocidades relativas bajas. Se propone una metodología para la evaluación de los riesgos basada en la identificación y análisis de satélites vecinos peligrosos, que combina parámetros cuantitativos con análisis de patrones de vida. Finalmente, el trabajo incluye estrategias de mitigación operativas, ya sean maniobras específicas de evasión u optimización de planes nominales de *station keeping*, incluyendo un algoritmo para el cálculo de maniobras de escape basado en la teoría de juegos y el análisis de casos reales de «dogfighting». Del estudio se desprende que la integración efectiva de SDA y SST mejora de forma significativa la detección temprana de RPO, la caracterización de la amenaza y la capacidad de reacción, proporcionando más tiempo e información para la toma de decisiones.

Palabras clave: Conocimiento del Dominio Espacial (SDA - *Space Domain Awareness*), Operaciones de proximidad (RPO - *Rendez-vous and proximity operations*), Satélites inspectores, Patrones de vida, Caracterización de amenazas en SDA y maniobras de evasión.

198 – Identificación temprana de trayectorias en operaciones de lanzamientos

Autores: Moreno, David[1]; Gallego, Ángel[1]; Martínez, Álvaro[1]; López, Juan José[2]

Resumen. La dependencia permanente de capacidades espaciales por parte de los sistemas civiles y militares ha consolidado el dominio espacial como una dimensión crítica para la defensa nacional y la estrategia militar. Las operaciones espaciales se desarrollan cada vez más en un entorno disputado, congestionado y militarizado. Sin embargo, no todas las amenazas se originan en el espacio: el empleo de misiles balísticos, sistemas antisatélite (ASAT) de ascenso directo y la proliferación de vehículos de lanzamiento orbital introducen nuevas complejidades operativas. En este contexto, el conocimiento del dominio espacial (SDA, *Space Domain Awareness*) se enfrenta al reto de la detección y caracterización tempranas de operaciones de lanzamiento potencialmente hostiles. La fase de impulso de estos vehículos representa la ventana más crítica para la detección y la respuesta estratégica, caracterizada por altas emisiones infrarrojas y una rápida aceleración. Sin embargo, durante estas primeras etapas, las trayectorias resultantes de los diferentes tipos de vehículos o armas muestran trazas cinemáticas muy similares, sobre todo cuando se

[1] GMV.
[2] GMV – Politécnico di Milano.

dispone de un número limitado de medidas o de observaciones con un nivel de ruido significativo. Esta ambigüedad inherente plantea un gran desafío para los sistemas de alerta temprana, donde la ausencia de modelos dinámicos comunes para la discriminación rápida limita la capacidad de evaluar amenazas y ejecutar las contramedidas oportunas. Este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta integrada para la modelización, simulación y evaluación de las trayectorias de ascenso directo en el contexto del conocimiento del dominio espacial (*Space Domain Awareness*). El estudio se centra en la dinámica de la fase de impulso de tres clases representativas de vehículos: misiles balísticos, sistemas antisatélite de ascenso directo y lanzadores orbitales. En primer lugar, se formula la herramienta de modelización de trayectorias capaz de reproducir la dinámica de ascenso de las distintas clases de vehículos mencionados. Los modelos son validados frente a trayectorias reales, como el caso del ensayo antisatélite de la misión india Shakti. A continuación, se genera una base de datos de trayectorias suficiente y representativa, que capte el comportamiento característico de cada tipo de trayectoria. Partiendo de esta base de datos, se implementa una metodología de clasificación de las trayectorias basada en el algoritmo de K-vecinos más cercanos (KNN, *K-nearest neighbours*), empleando medidas procedentes de una red de sensores embarcados, con el fin de mejorar la capacidad de discriminación temprana de los sistemas de defensa.

Palabras clave: Conocimiento del dominio espacial (SDA - *Space Domain Awareness*), Alerta y monitorización tempranas de lanzamientos, Análisis de trayectorias, Misiles balísticos y sistemas antisatélites (ASAT).

8.5
Otras aplicaciones espaciales para Defensa

32 – Seguridad espacial: transfiriendo escombros espaciales de la órbita geoestacionaria a una órbita cementerio

Autores: Dena Arto, Ángeles[1]; Casanova Ortega, Daniel[1]; Lacruz Calderón, Elvis[2]

Resumen. La creciente acumulación de escombros espaciales en la región geoestacionaria (GEO) constituye un riesgo crítico para la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones espaciales. En un contexto en el que el espacio resulta esencial para las telecomunicaciones, la vigilancia y observación de la Tierra, la navegación y las misiones de defensa, el deterioro del entorno geoestacionario puede comprometer el funcionamiento seguro y continuo de estos sistemas. La alta densidad de objetos en esta región incrementa la probabilidad de colisiones y podría desencadenar efectos en cadena. En línea con las directrices de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026), que subraya la importancia estratégica del dominio espacial y la necesidad de preservarlo, este trabajo analiza el coste del Delta-v necesario para transferir agrupaciones de escombros desde órbitas cercanas a GEO hacia órbitas cementerio. Para ello, se emplean técnicas de identificación de agrupaciones de escombros

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza – Academia General Militar.
[2] Valencian International University.

espaciales que permiten tratar conjuntos de objetos con dinámica similar. Posteriormente, se diseñan e implementan maniobras orbitales aplicables a situaciones generales, incluyendo transferencias entre órbitas elípticas no coplanares y no coaxiales. Este enfoque facilita la optimización del consumo de combustible y mejora la eficiencia global del proceso de retirada. El objetivo principal es optimizar el Delta-v requerido para trasladar escombros espaciales mediante maniobras orbitales eficientes, contribuyendo a la preservación del entorno espacial y al mantenimiento de los servicios esenciales que dependen de él.

Palabras clave: Delta-v, Escombros espaciales, Órbita cementerio, Órbita geoestacionaria, Transferencia orbital.

Área 9
COMBATIENTE

9.1
Sistema combatiente y sanidad militar

201 – Entrenamiento y adiestramiento continuado a través de realidad aumentada de aeroevacuaciones para el personal sanitario

Autores: Salvador Sanchez, Pilar[1]; Vicioso Benitez, Salvador[1]

Resumen. La Unidad Médica de Aeroevacuación (UMAER), junto con MALOG y en el marco del proyecto BACSI, avanza en la modernización de su capacidad formativa mediante tecnologías de simulación clínica avanzada y realidad inmersiva. La iniciativa responde a la necesidad de entrenar a personal sanitario especializado en escenarios clínicos complejos dentro de entornos aeronáuticos, reproduciendo con alta fidelidad las condiciones reales de una misión de aeroevacuación médica. El proyecto integra *hardware* y *software* de simulación clínica con entornos de realidad virtual y aumentada, incluyendo un maniquí de altas prestaciones capaz de reproducir respuestas fisiológicas humanas y conectarse con dispositivos de realidad mixta. Esta combinación permite practicar técnicas médicas invasivas y no invasivas y recrear casos clínicos complejos. MALOG ha diseñado la integración del maniquí con entornos aumentados que simulan plataformas aéreas empleadas por la UMAER,

[1] MINISDEF.

como el Dassault Falcon 900, con sus limitaciones espaciales y operativas. Además, un instructor puede modificar en tiempo real parámetros clínicos y variables del entorno, como turbulencias, iluminación, ruido o emergencias a bordo. El sistema facilita la evaluación de competencias técnicas y no técnicas, mejora la preparación del personal y aumenta la seguridad y eficacia de las misiones en entornos complejos.

Palabras clave: Adiestramiento, Aeroevacuación, Realidad aumentada.

17 – Evolución de la tecnología de exoesqueletos en España: del proyecto GUDEX a los sistemas híbridos inteligentes para mantenimiento y logística militar

Autores: Diaz, Iñaki[1]; Justo Pereira, Xabier[1]; Ugartemendia, Axier[1]

Resumen. El desarrollo de exoesqueletos responde a una evolución tecnológica que, aunque tiene antecedentes desde finales del siglo XIX, recibió un nuevo impulso a comienzos del siglo XXI con programas de DARPA y sistemas como BLEEX y XOS. Estos desarrollos mostraron un gran potencial, pero también limitaciones relevantes en autonomía y latencia de respuesta. En España, el programa COINCIDENTE 2020 permitió al consorcio formado por CEIT, GOGOA y FECSA desarrollar GUDEX, un exoesqueleto semiactivo, modular y ligero orientado a potenciar las capacidades físicas del combatiente. Desde entonces, la investigación ha evolucionado hacia sistemas de miembro superior y ha incorporado aprendizajes procedentes de aplicaciones industriales ferroviarias para su retorno al ámbito de la Defensa. El trabajo presenta un nuevo exoesqueleto de miembro superior, con funcionamiento pasivo y activo, diseñado para tareas de mantenimiento sobre los hombros. El sistema refleja avances en diseño mecánico, electrónica, actuadores y control inteligente.

[1] CEIT.

Además, se analizan retos y limitaciones asociados a actuadores, controladores, diseño, aplicaciones e integración de inteligencia artificial. Estos desarrollos nacionales y su proyección europea contribuyen a reducir dependencias de tecnologías críticas de terceros países.

Palabras clave: Exoesqueletos, Factores humanos, Robótica.

9.2
Factores humanos

93 – Influencia del diseño del calzado en la fatiga y el rendimiento del usuario en entornos operativos

Autores: Ricote López, Saray[1]; Herrero Rico, José Lorenzo[1]; Orgiles Calpena, Elena[1]; Romero Sánchez, María Dolores[1]; Aran Ais, Francisca[1]

Resumen. El rendimiento del personal en entornos operativos depende en gran medida del equipamiento utilizado, siendo el calzado un elemento crítico que influye de manera directa en la movilidad, la resistencia a la fatiga y la seguridad del usuario. Sin embargo, su evaluación se ha centrado tradicionalmente en parámetros técnicos normalizados, con un análisis limitado desde la perspectiva del usuario y su comportamiento en condiciones reales de uso. El presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia del diseño del calzado en la fatiga y el rendimiento del usuario mediante la integración de metodologías centradas en el usuario desarrolladas en INESCOP. Para ello, se han evaluado distintos diseños de calzado técnico empleados en aplicaciones de defensa, seguridad y emergencias, considerando parámetros como el ajuste y la adecuación de la horma, la distribución de presiones, la transpirabilidad, el confort térmico, la movilidad y la ergonomía. Los resultados obtenidos evidencian que el diseño de la horma y el ajuste influyen significativamente

[1] INESCOP. Instituto Tecnológico del Calzado. Elda-Alicante.

en la aparición de puntos de presión localizados, asociados a incomodidad y fatiga del personal. Del mismo modo, se observan compromisos entre propiedades mecánicas y confort, donde configuraciones más rígidas aportan estabilidad, pero pueden limitar la movilidad y aumentar la fatiga. En relación con el confort térmico, una baja transpirabilidad se traduce en incrementos de temperatura y humedad interna, afectando de manera negativa a la percepción de confort y al rendimiento en usos prolongados. Estos resultados confirman que determinados parámetros de diseño del calzado tienen un impacto directo en la fatiga y el confort térmico del usuario, factores clave en escenarios operativos prolongados. Además, evidencian limitaciones en los enfoques tradicionales de evaluación, que no siempre reflejan adecuadamente las condiciones reales de uso. La integración de metodologías centradas en el usuario permite avanzar hacia sistemas de evaluación más representativos, contribuyendo al desarrollo de soluciones más seguras y eficientes, junto con una mejora del rendimiento y reducción de fatiga y la optimización del equipamiento en aplicaciones de defensa y seguridad.

Palabras clave: Calzado militar y emergencia, Funcionalidad y confort, Condiciones reales de uso.

94 – Neuromonitorización en avión de combate: estudio de viabilidad en pilotos de F-18 en entorno operacional

Autores: Carpio-Chicote, Ainara[1]; Torija-Martínez, Pablo[2]; Capellín Millá, Juan Manuel[3]; Melgar García, Laura[2]; Arnaldo Valdés, Rosa María[4]; Kontaxakis, George[5]; Gómez, Enrique J.[1]

Resumen. Conocer el estado fisiológico y cognitivo de los pilotos es clave para mejorar la seguridad, la toma de decisiones y el rendimiento en operaciones aéreas. Sin embargo, la integración de sistemas de neuromonitorización en cabinas de aeronaves militares plantea importantes desafíos técnicos, sobre todo relacionados con la aeronavegabilidad, las limitaciones ergonómicas, la compatibilidad con el equipamiento de vuelo y la degradación de la calidad de la señal en entornos altamente dinámicos y con un exigente ambiente mecánico y electromagnético. En

[1] Grupo Bioingeniería y Telemedicina, CTB, ETSIT, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[2] Departamento de Inteligencia Artificial, ETSI Informáticos, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[3] Mando de Apoyo Logístico del Ejército del Aire y del Espacio.
[4] Dpto. de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y Aeropuertos, ETSIAE, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[5] Information Processing and Telecommunications Center, ETSIT, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.

este trabajo, fruto de una colaboración entre el Ejército del Aire y del Espacio y la Universidad Politécnica de Madrid, en el grupo de investigación NeuroTechAI, se presenta un estudio piloto de viabilidad orientado a evaluar la integración de sistemas de electroencefalografía (EEG) y sensores fisiológicos en condiciones representativas del entorno operacional de pilotos de combate. Los datos fueron recogidos en el Ala 12, en la Base Aérea de Torrejón de Ardoz. El estudio aborda dos dimensiones complementarias: (i) el análisis ergonómico de la integración de sensores en presencia de casco, traje de vuelo y restricciones de cabina, y (ii) la caracterización de la calidad de la señal en simulador de vuelo y en una aeronave operativa en plataforma, tanto estacionaria como en rodaje de baja velocidad. Se diseñó un protocolo experimental controlado en el que se adquirieron señales EEG mediante un sistema portátil de ocho canales húmedo, modificado para su compatibilidad con el casco de piloto. Se evaluó la interacción con la aeronave, la ergonomía y la adaptabilidad de sensores comerciales a las restricciones de cabina, protocolos de seguridad y equipamiento militar. La calidad de la señal se analizó mediante métricas como la relación señal-ruido (SNR) y el cociente de varianza tarea-*baseline* (TBVR), cuantificando el efecto de artefactos y la robustez de distintas bandas de frecuencia. Los resultados muestran que el uso del casco no degrada de forma sistemática la calidad de la señal EEG y, en determinadas condiciones, incluso la mejora mediante la estabilización mecánica de los electrodos. Asimismo, se identifican las bandas theta y alpha como las más robustas para la monitorización de carga cognitiva en entornos operacionales, mientras que las altas frecuencias presentan mayor sensibilidad a artefactos. En conjunto, este trabajo demuestra la viabilidad técnica de la monitorización neurofisiológica en entornos aeronáuticos militares, su compatibilidad con una aeronave operativa y proporciona directrices prácticas para el diseño de futuros estudios en simulador y vuelo real.

Palabras clave: Neurotecnología, Neuromonitorización, Electroencefalografía (EEG), Aviación militar, Factores humanos, Carga cognitiva, Ergonomía, Entornos operacionales.

96 – Monitorización y análisis multimodal de la carga mental mediante neurotecnología e inteligencia artificial en aviación militar

Autores: Torija-Martínez, Pablo[1]; Carpio-Chicote, Ainara[2]; Domenech, Ana S.[2]; Zamarreño Suárez, María[3]; Oropesa, Ignacio[2]; Bajo, Javier[1]; Gómez Blanco, Rafael[4]; Gómez, Enrique J.[2]

Resumen. La evaluación objetiva de la carga mental en pilotos constituye un elemento clave para mejorar la seguridad operacional, optimizar el entrenamiento y avanzar hacia sistemas aeronáuticos adaptativos centrados en el humano. En este contexto, la neurotecnología se posiciona como una herramienta clave para la monitorización y análisis de los estados cognitivos del piloto. Sin embargo, la medición fiable de dichos estados en entornos de alta complejidad sigue siendo un desafío debido a la variabilidad interindividual, la naturaleza dinámica de las tareas y las limitaciones de los sistemas de adquisición en condiciones realistas.

[1] Departamento de Inteligencia Artificial, ETSI Informáticos, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[2] Grupo Bioingeniería y Telemedicina, CTB, ETSIT, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[3] Dpto. de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y Aeropuertos, ETSIAE, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[4] Ejército del Aire y del Espacio.

Este trabajo, desarrollado en colaboración entre el Ejército del Aire y del Espacio y la Universidad Politécnica de Madrid, en el grupo de investigación NeuroTechAI, presenta un marco metodológico y experimental para la estimación de la carga mental mediante la integración de señales neurofisiológicas y técnicas de inteligencia artificial. El estudio experimental combina electroencefalografía (EEG), electrocardiografía (ECG) y seguimiento ocular, adquiridos de forma sincronizada mediante protocolos estandarizados. Se diseñaron dos tipos de experimentos: (i) un entorno controlado basado en tareas cognitivas tipo N-back para establecer referencias de carga mental, y (ii) un entorno ecológico con tareas multitarea inspiradas en escenarios aeronáuticos mediante la plataforma OpenMATB, aproximando condiciones operacionales reales. Las señales adquiridas fueron procesadas mediante *pipelines* de preprocesado, segmentación en ventanas temporales y extracción de características. Se calcularon métricas espectrales en bandas EEG clásicas (delta, theta, alpha, beta y gamma), así como ratios relevantes e índices derivados como *engagement*. Asimismo, se incorporaron descriptores estadísticos (media, desviación estándar, asimetría y curtosis) para caracterizar la dinámica temporal. Con estas características, se implementaron modelos de aprendizaje automático supervisado (Random Forest, SVM, XGBoost) para la clasificación de niveles de carga mental. Los resultados muestran que es posible discriminar entre niveles de carga mental con un rendimiento consistente, alcanzando precisiones cercanas al 70 % en entornos controlados. El análisis de relevancia de características evidencia el papel predominante de la actividad EEG en regiones frontales, mientras que las variables cardiovasculares y oculométricas aportan información complementaria. En conjunto, este trabajo demuestra la viabilidad de un enfoque multimodal para la estimación de la carga mental en aviación militar y establece las bases para su aplicación en sistemas de monitorización. Estos resultados contribuyen al desarrollo de neurotecnologías e inteligencia artificial con impacto en la seguridad, la toma de decisiones y la evolución hacia sistemas aeronáuticos adaptativos.

Palabras clave: Neurotecnología, Inteligencia artificial, Electroencefalografía (EEG), Análisis multimodal, Carga mental, Aviación militar, Factores humanos.

170 – Metodología integral para mitigar la exposición a ruido y vibraciones en plataformas militares

Autores: Ainsa Claver, Ignacio[1]; Royo Quilez, José Manuel[1]; Núñez Bruis, José Luis[1]; Calvo Molina, Susana[1]

Resumen. La naturaleza de las plataformas militares terrestres, aéreas y navales genera elevados niveles de ruido acústico y vibraciones, provocando riesgos significativos para la salud y el rendimiento de los combatientes. Además de las conocidas lesiones auditivas, el efecto combinado de determinados ruidos y vibraciones puede, por un lado, provocar mareos y pérdidas de concentración por desgaste físico y mental acumulado, y, por otro lado, enmascarar sonidos críticos para la seguridad y la eficacia operativa, como disparos externos u otros eventos relevantes en el entorno de la misión. Estos riesgos adquieren mayor relevancia en plataformas de espacio reducido y alta densidad de fuentes de ruido acústico, como carros de combate, helicópteros, aviones de combate y submarinos, donde, además, la exposición es continua y prolongada. La mitigación de estos riesgos es posible mediante la aplicación de tecnologías avanzadas de reducción de ruido y vibraciones. Dichas tecnologías han experimentado un notable desarrollo en sectores como la maquinaria

[1] Instituto Tecnológico de Aragón.

y la automoción, demostrando mejoras significativas tanto en la salud como en el confort de las personas. La transferencia y adaptación de estas soluciones al ámbito militar requiere un enfoque específico que tenga en cuenta las exigencias operativas, de cumplimiento normativo y de robustez propias de la defensa. En este contexto, el ITA ha desarrollado una metodología integral que engloba buenas prácticas, además de herramientas numéricas y experimentales, para abordar proyectos de mitigación de la exposición al ruido y a las vibraciones de los combatientes. Esta metodología cubre todas las fases de los procesos de diseño y puesta en servicio, desde la identificación y caracterización de las fuentes de excitación, hasta la implementación y la validación de las soluciones. A lo largo del proceso, se integran conocimientos del estado del arte sobre los efectos del ruido y las vibraciones en el cuerpo humano, considerando de forma específica sus características frecuenciales y temporales, y tomando como referencia los valores que dan lugar a acciones y límites de exposición definidos en las normas técnicas y la legislación. Finalmente, la aplicación sistemática de esta metodología permite no solo reducir los riesgos para la salud y mejorar el confort de los combatientes, sino también incrementar la conciencia de la presencia de peligros y la eficacia operativa. La incorporación de criterios de mitigación de ruido y vibraciones en plataformas militares constituye un elemento clave para el desarrollo de sistemas más seguros y respetuosos con la salud.

Palabras clave: Ruido, Vibraciones, Plataformas militares, Salud.

191 – Estudio piloto de análisis biomecánico de la marcha (con y sin carga) de sujetos de los cuerpos de seguridad del Estado

Autor: Giannikelis, Konstantinos[1]

Resumen. Introducción: el análisis de la marcha humana es esencial para evaluar de forma precisa la funcionalidad motora, especialmente en colectivos con alta exigencia física como los cuerpos de seguridad. Sin embargo, pocas investigaciones han evaluado de manera objetiva los efectos biomecánicos del porte de carga en la marcha de estos profesionales. Este estudio piloto responde a la necesidad de generar conocimiento empírico sobre los desajustes y compensaciones mecánicas que pueden derivarse del uso del equipamiento operativo. Objetivo: el objetivo es identificar, mediante herramientas biomecánicas avanzadas, las alteraciones cinemáticas y cinéticas de la marcha en sujetos de los cuerpos de seguridad del Estado, comparando condiciones con y sin carga, para establecer un diagnóstico funcional y promover futuras líneas de intervención ergonómica. Metodología: se utilizó el sistema Motek GRAIL, una plataforma de análisis en tiempo real que combina realidad virtual y captura de movimiento para simular entornos desafiantes y registrar variables biomecánicas. Se evaluó la marcha de varios sujetos en dos

[1] Universidad de Extremadura.

velocidades distintas y bajo dos condiciones: sin carga (SC) y con carga (CC). Se analizaron ángulos articulares, momentos y potencias en pelvis, cadera, rodilla y tobillo, así como parámetros espaciotemporales del ciclo de la marcha. Resultados: en ambas condiciones, se evidenciaron diferencias relevantes entre extremidades en múltiples fases del ciclo de marcha. Con carga, estas diferencias tendieron a intensificarse, afectando en especial a los patrones de flexo-extensión, rotación y abducción de articulaciones clave. Los análisis de potencia y momentos articulares revelaron un mayor esfuerzo mecánico, particularmente en extremidades dominantes. Se observó que la carga genera patrones compensatorios asimétricos que podrían incrementar el riesgo de lesiones musculoesqueléticas. Conclusiones: Este estudio destaca la utilidad de las herramientas biomecánicas para evaluar con precisión las exigencias físicas del trabajo policial. Los hallazgos apoyan la necesidad de rediseñar equipamientos y protocolos de entrenamiento que minimicen los riesgos derivados del porte de carga. Este enfoque puede mejorar el rendimiento funcional, reducir la incidencia de lesiones y optimizar la salud ocupacional de los cuerpos de seguridad.

Palabras clave: Marcha, Análisis biomecánico, Carga, Cuerpos de seguridad, Motek GRAIL, Lesiones musculoesqueléticas.

209 – Evaluación de la carga cognitiva de pilotos militares mediante potencia theta EEG, estudio experimental en simulador avanzado

Autores: Navarro, Elvira[1]; Sebastián Guerrero, María Victoria[1]; Rodríguez Bermúdez, Germán[2]; Barbe, Hugo[3]; Ruiz López, Carlos[1]; Iso Pérez, José María[1]

Resumen. La aviación militar se desarrolla en un marco operativo de alta exigencia cognitiva en el que analizara la carga de trabajo del piloto adquiere una relevancia sustancial con el fin de prevenir errores y accidentes asociados tanto a una sobrecarga mental como a una demanda cognitiva demasiado baja. El objetivo de este estudio es ejecutar un experimento neurofisiológico para medir la actividad cerebral en pilotos militares utilizando el electroencefalograma (EEG) en un simulador de vuelo Pilatus PC-21. Concretamente, el presente trabajo se centra en el estudio de la banda de frecuencia theta (4-7 Hz) cuya actividad se vincula estrechamente con procesos de control ejecutivo, memoria de trabajo y la asignación de recursos atencionales ante tareas de alta complejidad. La metodología incluye el registro de señales EEG con ocho electrodos activos posicionados en el cuero cabelludo. La muestra está

[1] CUD-AGM.
[2] CUD-AGA.
[3] Ecole Air France.

compuesta por diez pilotos alumnos militares durante estados basales y durante tres módulos de simulación de vuelo con distintos niveles de dificultad. También se evalúan el rendimiento y las calificaciones subjetivas de la carga de trabajo mental de la tarea a través del cuestionario NASA-TLX que completaron los sujetos después de cada fase de simulación de vuelo. El análisis cuantitativo de las señales muestra cómo el espectro de potencia dela banda theta del EEG aumenta en las fases de vuelo más demandantes. Este aumento se presenta a lo largo de toda la distribución de los electrodos; en las áreas frontales, occipitales parietales y temporales. El análisis de las seis dimensiones percibidas a través del cuestionario NASA-TLX permite identificar un incremento de las dimensiones demanda temporal, esfuerzo, rendimiento y frustración en el escenario de simulación de mayor carga cognitiva. No obstante, no fue posible encontrar una correlación significativamente directa entre estas valoraciones subjetivas aportadas por los sujetos, y las métricas EEG obtenidas.

Palabras clave: Aeronaves militares, Frecuencia theta, Señales EEG, Simulador de vuelo, Personal militar.

211 – Tiempos de respuesta y rendimiento cognitivo en entornos de instrucción naval en la ENM: implicaciones operativas

Autores: Carpentier, Alicia V.[1]; Mariño-Villar, Rodrigo[2]; Cores-Carrera, Debora[1]; Álvarez-Hernández, María[3]; Carrasco, Pedro[1]; González-Cela Echevarría, Gerardo[1]; Eiras-Barca, Jorge[3]; Mesas López, Elena[1]

Resumen. La rapidez con la que se responde ante determinadas situaciones puede marcar la diferencia entre un accidente o una negligencia y un resultado satisfactorio. Este hecho es relevante tanto en la vida cotidiana como en el ámbito profesional y, en particular, en condiciones de navegación. Más concretamente, las misiones militares requieren de respuestas rápidas y coordinadas; así, no solo se exige que cada individuo responda de manera eficiente, sino que sea capaz de coordinarse con el resto del equipo. En este trabajo, se analiza el rendimiento cognitivo del alumnado de la Escuela Naval Militar de Marín a partir del estudio de los tiempos de respuesta en un entorno de instrucción naval. Para ello, se recogieron datos experimentales antes y después de las actividades de instrucción a lo largo de varias semanas. El análisis se fundamenta

[1] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar;.
[2] Universidad de Santiago de Compostela.
[3] Universidad de Vigo.

en técnicas de estadística descriptiva, comparativa y correlacional, con el objetivo de caracterizar los tiempos de respuesta, su variabilidad y su relación con variables fisiológicas, contextuales y operativas. A una parte del alumnado participante se le suministraron relojes inteligentes para medir la calidad y cantidad de sueño. Asimismo, se implementó un protocolo de protección de datos que garantizaba el anonimato mediante la asignación de códigos únicos a cada participante. En el análisis, se comparan los resultados tanto a nivel global como por brigadas, considerando, además, el número de errores en las pruebas. En este sentido, los resultados muestran que el alumnado con mejor rendimiento cognitivo presenta tiempos de respuesta más bajos y mayores niveles de precisión; esto es, menos fallos. Finalmente, el estudio permite evaluar la utilidad de los test propuestos para comparar la agilidad cognitiva antes y después de actividades con carga física. Estos hallazgos contribuyen a optimizar el diseño experimental y a proponer mejoras tanto en los instrumentos de evaluación como en su aplicación en otros contextos.

Palabras clave: Tiempos de respuesta, Rendimiento cognitivo, Análisis estadístico, Procesamiento de la información, Entorno operativo.

222 – Soluciones no invasivas, conectadas y predictivas para la monitorización de la salud del combatiente en tiempo real

Autores: Atorrasagasti Goyalde, Garbiñe[1]; Ibarlucea Canton, Bergoi[1]; Peña-Díaz, Marina[1]; Lou Franco, Javier[1]; Lorenzo Chocarro, Jaione[1]; Olalde Graells, Beatriz[1]; Kostic, Milos[1]

Resumen. La monitorización de la salud del combatiente es un factor crítico para garantizar la seguridad del personal y mantener el rendimiento operativo. La capacidad de detectar precozmente estados de riesgo (como la deshidratación, la fatiga extrema, el estrés térmico o el deterioro cognitivo), así como la exposición a amenazas NRBQ, permite una toma de decisiones basada en datos. Esto facilita la intervención temprana, la redistribución eficiente de tareas y la asistencia médica oportuna, optimizando la gestión de recursos y reduciendo los costes asociados a lesiones y enfermedades. En este contexto, los biosensores transdérmicos

[1] Tecnalia Research and Innovation.

representan un avance disruptivo en la monitorización fisiológica no invasiva*. Al acceder a biomarcadores presentes en el líquido intersticial (ISF) o el sudor, estos sensores proporcionan información crítica sobre el estado fisiológico del combatiente en tiempo real. A diferencia de los métodos convencionales de muestreo (sangre o saliva), estas soluciones ofrecen una alternativa no invasiva y cómoda que permite el seguimiento continuo de proteínas, hormonas, electrolitos y parámetros vitales (temperatura, presión arterial o frecuencia cardíaca), asegurando una capacidad de respuesta instantánea ante cualquier alerta. TECNALIA cuenta con una trayectoria consolidada en el desarrollo de parches y textiles multielectrodo impresos por serigrafía, que integran sensores electroquímicos y físicos para un monitoreo integral [Patent Application P233295-EP]. Estas soluciones permiten la medición simultánea de temperatura, conductividad, fuerza iónica, pH, lactato, cortisol y electrolitos (sodio y potasio). Como ejemplo de esta capacidad, se ha desarrollado un parche con alta resolución en el rango fisiológico (135-145 mM de sodio) y una respuesta lineal capaz de detectar disnatremia (130-150 mM)**, además de mediciones precisas de temperatura (30-36 ºC) y pH (5,10-7,07). Asimismo, se han implementado soluciones textiles capaces de monitorizar simultáneamente lactato, sodio, frecuencia cardíaca y temperatura. La integración de estos multisensores en dispositivos portátiles y conectados (parches o prendas textiles) permite transferir datos en tiempo real a una aplicación móvil. El valor añadido reside en el análisis de datos multimodales y la implementación de modelos predictivos que anticipan el deterioro de las capacidades operativas antes de que sea clínicamente evidente. Esta herramienta optimiza la gestión de equipos, previniendo eventos críticos y aumentando la eficacia operativa. Por último, estas tecnologías poseen alta versatilidad y un claro carácter dual, siendo plenamente aplicables en el ámbito civil para la gestión de enfermedades y el seguimiento del rendimiento deportivo.

Palabras clave: Monitorización de la salud, Soluciones no invasivas, Detección multimodal, Fusión de datos, Textiles multielectrodo impresos por serigrafía.

---

* DOI: 10.1038/nature16521

** DOI: 10.1186/1824-7288-35-36

245 – Garantizando la seguridad operacional: arquitectura de un predictor en cuasitiempo real para interfaces multimodales de *silent speech*

Autores: Nikolopoulos, Emmanouil[1]; Lobo Alonso, Mario[1]; Information Processing and Telecommunications Center[2]; Universidad Politécnica de Madrid[3]; Gómez, Enrique J.[4]; Oropesa, Ignacio[4]

Resumen. Una comunicación rápida y fiable es esencial en ámbitos críticos para la seguridad, como la aviación. El habla acústica se ve comprometida por el ruido excesivo y la sobrecarga cognitiva, poniendo en riesgo a los operadores y la seguridad de la misión. Por ello, mejorar la velocidad y proteger la integridad del contenido de la comunicación es una motivación esencial para explorar alternativas. Las interfaces multimodales de *silent speech interfaces* (SSI) ofrecen un sustituto no invasivo y tolerante al ruido que evita las interferencias ambientales. Sin embargo, para un despliegue seguro, una SSI requiere una arquitectura predictiva

[1] NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[2] IPTC.
[3] UPM.
[4] Biomedical Engineering and Telemedicine Centre, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid.

en tiempo real. Este estudio describe un demostrador predictivo de bucle cerrado que emplea electromiografía (EMG) y unidades de medidas inerciales (*inertial measurement units*, IMU) para decodificar instantáneamente comandos silenciosos. El predictor utiliza una arquitectura distribuida para cumplir con los rigurosos requisitos de latencia operativa. Se basa en un modelo de aprendizaje profundo: una *Convolutional Neural Network* (CNN) híbrida combinada con una unidad de *Bidirectional Long Short Term Memory* (BiLSTM) y *Multihead Attention*. Este modelo se entrenó con datos fusionados y preprocesados de EMG e IMU. El protocolo *Lab Streaming Layer* (LSL) unifica temporalmente las bioseñales en vivo, evitando su desincronización. Una ventana deslizante fijada al inicio del estímulo alimenta el marco con datos sincronizados para la predicción en vivo. Evaluamos tres escenarios: adaptación semipersonalizada, optimización totalmente personalizada y transferencia preentrenada. La resiliencia del sistema se verificó utilizando datos nuevos de un participante realizando tareas múltiples de vuelo. La viabilidad del código se evaluó mediante la latencia de inferencia, la precisión predictiva y la estabilidad temporal. El sistema alcanzó una latencia media de unos 500 ms, incluyendo el preprocesamiento y la latencia del tiempo de inferencia. Esta baja latencia garantiza una respuesta instantánea al usuario. Además, el escenario semipersonalizado resultó ser la estrategia de despliegue más segura. Este proyecto cierra la brecha entre el modelado *offline* y el despliegue crítico para la seguridad. Demuestra que la decodificación del SSI es viable, mejorando de forma significativa la seguridad comunicativa y del operador. Trabajos futuros pueden indagar cómo eliminar la dependencia de la sincronización explícita del inicio del estímulo y superar la deriva de los sensores para lograr una decodificación continua y totalmente asíncrona que garantice una comunicación a prueba de fallos.

Palabras clave: *Silent Speech Interface*, EMG, IMU.

258 – Neurociencia cognitiva aplicada a la formación y evaluación de operadores HUMINT a través de simulación VR+AI+sensores

Autores: Prades Piña, Álvaro[1]; Sroka, Anna[2]

Resumen. En el ámbito de la defensa y la seguridad, el factor más crítico e impredecible de cualquier operación no es tecnológico, sino biológico: la mente del operador. Durante las misiones de Inteligencia de Fuentes Humanas (HUMINT) y gestión de crisis, la toma de decisiones bajo estrés extremo y la sobrecarga cognitiva determinan el éxito o el fracaso operativo. Tradicionalmente, la instrucción táctica ha dependido de simulaciones cinéticas o ejercicios de campo (*role-plays*) subjetivos, dejando un vacío estructural en la simulación y medición de la carga cognitiva. Para resolver este desafío, se presenta HumintAI, una plataforma de tecnología profunda (*Deep Tech*) que digitaliza y estandariza la instrucción operativa fusionando neurociencia cognitiva, inteligencia artificial adaptativa, sensores biométricos y realidad extendida (VR/XR). El sistema cubre la brecha entre la simulación física y la cognitiva

[1] Cognotica.
[2] Cátedra de Ciberseguridad en el ámbito Social, Empresarial y de la Defensa, Universidad CEU San Pablo.

apoyándose en dos motores tecnológicos propietarios: 1. Percepción multimodal (*Insight*): a través de sensores no invasivos, el sistema captura y clasifica el estado interno del operador en tiempo real. Utilizando pupilometría avanzada, análisis de voz (prosodia) y bioseñales (HRV, GSR), el motor mide objetivamente la fatiga cognitiva, el foco atencional y la activación fisiológica. Todo ello con una precisión científica validada en la clasificación cognitivo-emocional superior al 93 %. 2. IA emocional y conductual (*Mind*): inmerso en entornos hiperrealistas VR (embajadas, zonas de conflicto o salas de interrogatorio), el operador interactúa con interlocutores virtuales (metahumanos). Estos avatares reaccionan dinámicamente al tono de voz y lenguaje corporal del usuario, modulando su perfil (hostil, cooperativo, manipulador) bajo una arquitectura de generación constreñida que garantiza un ratio de alucinación inferior al 2 %. El principal avance metodológico reside en la evaluación posoperacional (*Analytics*). HumintAI transforma la evaluación empírica y subjetiva en analítica estructurada. Los mandos obtienen métricas objetivas y trazables sobre la credibilidad, la persuasión y el control emocional del operador bajo presión. En el marco del XIII Congreso Nacional DESEi+d 2026, la ponencia tiene por objeto mostrar cómo la tecnología dual española, plenamente alineada con las doctrinas de la OTAN, permite reducir de forma significativa los riesgos y los costes logísticos de los ejercicios de campo. Al transformar los datos humanos en inteligencia operacional estructurada, HumintAI contribuye a proteger el recurso más valioso de nuestras Fuerzas Armadas: el operador.

Palabras clave: Neurociencia cognitiva aplicada a HUMINT, Realidad extendida VR/XR para entrenamiento operativo, Inteligencia artificial adaptativa y emocional, Sensores biométricos, Medición de carga y fatiga cognitiva, Simulación inmersiva de interrogatorios y obtención de fuentes.

264 – Guías técnicas para el análisis de la confianza del piloto en la automatización en entornos aeronáuticos militares altamente automatizados

Autores: Zamarreño Suárez, María[1]; Melgar García, Laura[2]; Torija-Martínez, Pablo[2]; Ribote Gutiérrez, Ana[1]; Bajo, Javier[2]; Gómez, Enrique J.[3]; Arnaldo Valdés, Rosa María[1]

Resumen. El desarrollo tecnológico y la integración de sistemas han permitido el desarrollo de cabinas altamente automatizadas en aviación militar, que seguirán evolucionando en el futuro. Para que la automatización sea efectiva, es necesario considerar el componente humano y fomentar la creación de equipos ser humano-automatización. Uno de los factores fundamentales que condiciona la efectividad de dicho equipo es la confianza del ser humano en la automatización. Este trabajo propone definir unas guías técnicas para su análisis riguroso. Tradicionalmente,

[1] Dpto. de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y Aeropuertos, ETSIAE, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[2] Departamento de Inteligencia Artificial, ETSI Informáticos, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.
[3] Grupo Bioingeniería y Telemedicina, CTB, ETSIT, NeuroTechAI, Universidad Politécnica de Madrid.

la confianza ha sido evaluada empleando escalas subjetivas. Si bien este enfoque presenta ventajas, este estudio propone considerar como complemento en su evaluación las medidas neurofisiológicas, que permiten caracterizar el estado cognitivo del piloto. Para una adecuada integración del estudio de la confianza en el entorno militar, se propone una aproximación secuencial organizada en tres etapas: i) la definición de un marco conceptual, ii) el desarrollo de experimentos en condiciones controladas para el registro de datos y iii) el análisis de dichos datos, aplicando técnicas de *machine learning*. Para el desarrollo del marco conceptual, se propone tener en cuenta la naturaleza dinámica de la confianza y una serie de elementos que puede condicionar una interacción determinada entre el piloto y la automatización, tales como su propensión inicial para confiar o la retroalimentación recibida sobre la fiabilidad de la automatización. El desarrollo de experimentos debe ser riguroso e incluir en el estudio las variables neurofisiológicas más relevantes, como la actividad cerebral, el seguimiento visual, la frecuencia cardiaca o la respuesta galvánica de la piel. Además, se consideran cuestionarios y escalas subjetivas. Se propone una serie de recomendaciones para la realización de estos experimentos. Por último, en cuanto al análisis de datos, se plantea una metodología secuencial de preprocesado y análisis. También se incluyen, en este trabajo, recomendaciones para su correcto desarrollo y aplicación. Como conclusión, este trabajo propone un conjunto de guías técnicas a considerar en el desarrollo de estudios para la evaluación de la confianza de los pilotos militares en la automatización, enmarcadas en los tres ejes descritos con anterioridad. El planteamiento considera el desarrollo de experimentos en laboratorio que puedan ser, posteriormente, escalables a situaciones operacionales más realistas. Para cada una de las etapas, se proponen buenas prácticas y el empleo de herramientas y técnicas, para poder integrar en el análisis medidas neurofisiológicas, junto con las medidas de evaluación subjetivas tradicionales.

Palabras clave: Confianza ser humano-automatización, Equipos ser humano-automatización, Automatización avanzada, Aviación militar.

270 – Apósitos inteligentes para la monitorización del combatiente: sensórica impresa, sistemas embebidos e inteligencia artificial para medicina táctica avanzada

Autora: Casellas, Cristina[1]

Resumen. La superioridad operativa en escenarios actuales requiere mejorar la protección, monitorización y capacidad de respuesta del combatiente en tiempo real. En línea con las prioridades de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID) y el desarrollo del concepto de «combatiente conectado», este trabajo presenta una solución basada en apósitos inteligentes que integran sensórica avanzada, electrónica impresa y sistemas embebidos para la monitorización continua del estado fisiológico en entorno táctico. La propuesta se fundamenta en tecnologías de impresión funcional y electrónica flexible que permiten la integración de sensores directamente sobre sustratos conformables y de contacto con la piel, garantizando ergonomía y mínima intrusión. Estos apósitos incorporan sensores fisiológicos capaces de medir parámetros como temperatura y biomarcadores en sudor (por ejemplo, lactato, conductividad, glucosa o cortisol), facilitando la evaluación del estrés, la

[1] EURECAT Centro Tecnológico.

fatiga y el riesgo de colapso fisiológico en tiempo real. Asimismo, la integración de sensores ambientales y de posicionamiento permite contextualizar la información en función de las condiciones de misión. El sistema se complementa con capacidades de procesamiento embebido e inteligencia artificial en el *edge*, que permiten la detección temprana de situaciones de riesgo, la generación de alertas y el apoyo a la toma de decisiones incluso en entornos con conectividad limitada. Este enfoque habilita sistemas predictivos que integran datos fisiológicos, biomecánicos y ambientales para optimizar el rendimiento y reducir bajas evitables. La solución presenta un alto potencial de madurez tecnológica (TRL medio-alto), con aplicabilidad en validación en entornos operativos y clara orientación dual en ámbitos como emergencias, deporte o salud digital, mercados que están traccionando hoy en día esta tecnología. Asimismo, contribuye al refuerzo de la Base Tecnológica e Industrial de Defensa (BTID) mediante el desarrollo de tecnologías estratégicas en sensorización avanzada y sistemas inteligentes. En conjunto, los apósitos inteligentes constituyen un elemento clave para la evolución hacia capacidades de medicina táctica avanzada, incrementando la seguridad, resiliencia y eficacia del combatiente en misión.

Palabras clave: Electrónica impresa, *Printed electronics*, *Smart patch*, Biosensores, Dispositivos portables, Monitorización, Salud.

281 – EXOEPI - Exoesqueleto de calzado para la asistencia del personal de emergencias

Autores: Arán Ais, Francisca[1]; Sanchís Mollá, Mónica[1]; Orgiles Calpena, Elena[1]; Herraiz Sala, Manuel[2]; Catalan Orts, José María[2]; Fernández-Irles, Clemente[3]; Blanco Ivorra, Andrea[4]; Pajares Salinas, Ramón[5]; García-Aracil, Nicolás[3]

Resumen. En el ámbito forestal, los trabajos de extinción de incendios realizados por el Personal Especialista en Extinción de Incendios Forestales (PEEIF) mayoritariamente implican desplazamientos con cargas elevadas, incluyendo equipos de protección individual (EPI) y herramientas de hasta 20 kg. Estas tareas suponen altos costes energéticos, considerándose de alta intensidad física, dando lugar probablemente a una fatiga adicional. Por ello, el proyecto EXOEPI surge con el objetivo de reducir la fatiga de los equipos de emergencias en los trabajos mencionados con anterioridad, mediante el desarrollo de un exoesqueleto integrado en botas de intervención, que proporcione asistencia continuada

[1] INESCOP. Instituto Tecnológico del Calzado. Elda-Alicante.
[2] UMH.
[3] Universidad Miguel Hernández.
[4] Neuroingeneira Biomedica, Universidad Miguel Hernandez de Elche.
[5] Panter. Industrial Zapatera S. A.

durante la marcha en los múltiples desplazamientos. De esta forma, se pretende lograr una reducción del coste energético en dichos trabajos. Para ello, este trabajo presenta el diseño del exoesqueleto, su sistema de control y actuación basados en algoritmos de inteligencia artificial, así como los resultados de las pruebas del dispositivo en un entorno controlado de laboratorio. Para ello, con el fin de examinar el esfuerzo físico durante el proceso de marcha, en condiciones activas y pasivas del dispositivo, se ha empleado una máscara analizadora de gases modelo CPET Cortex para obtener datos de consumo de oxígeno (VO2) de los participantes. Esta técnica ha sido empleada previamente en diversos estudios para evaluar la aplicación de dispositivos de tipo exoesqueleto tanto de miembro inferior como de miembro superior. El comportamiento del exoesqueleto, diseñado para adherirse a un calzado de protección individual, y la asistencia técnica, han sido evaluados mediante diferentes pruebas en los laboratorios de Inescop, durante la marcha controlada de un panel de sujetos portando el exoesqueleto en modo activo y en modo pasivo, simulando las condiciones de uso (4,5 km/h y 15 kg de carga). El panel estaba formado por cuatro sujetos varones sanos, con edades comprendidas entre veintitrés y veintiocho años de edad (26,0 ± 1,87 años), alturas de entre 176 y 181 cm (178,5 ± 2,06 cm) y pesos comprendidos entre 62 y 85 kg (73,25 ± 9,17 kg). Los resultados obtenidos en la monitorización del consumo de oxígeno del usuario, muestran una reducción de hasta el 15,68 % cuando se emplea el dispositivo ExoEpi en modo activo, con respecto a emplearlo en modo pasivo. Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Valenciana de Innovación a través del proyecto INNEST/2021/29.

Palabras clave: Exoesqueleto, Fatiga muscular, Inteligencia artificial.

Área 10

NRBQe

10.1
Tecnologías para C-IED

148 – Robótica móvil para la toma remota de muestras en entornos contaminados con aplicación dual defensa-civil

Autores: Arias Canseco, Javier A.[1]; Fabregat Periago, María D.[1]; Orgilés Calpena, Elena[1]; Gómez Hernández, José Francisco[1]

Resumen. La detección de contaminantes y amenazas químico-biológicas en entornos complejos constituye un reto estratégico para defensa, seguridad y aplicaciones civiles vinculadas a emergencias, infraestructuras críticas, gestión del agua y control ambiental. La presencia de contaminantes físicos, químicos y biológicos en aguas, lodos o superficies contaminadas exige metodologías de muestreo seguras, trazables y repetibles, capaces de reducir la exposición del personal. En este contexto, se plantea el desarrollo de una plataforma multisensorial inteligente para la detección de posibles contaminantes y amenazas, incluyendo microplásticos, PFAS, MOSH/MOAH y diferentes tipos de patógenos. La plataforma integra dispositivos *Point-of-Care/Point-of-Need* para detección rápida *in situ* y técnicas fotónicas de laboratorio, como espectroscopía y microscopía hiperespectral, orientadas a la confirmación y caracterización de contaminantes en matrices complejas. Dentro de este marco, se está desarrollando un subsistema robótico para la toma remota de muestras y el

[1] INESCOP - Footwear Technology Centre.

apoyo a la caracterización preliminar de áreas contaminadas. La solución combina una plataforma robótica móvil terrestre, un manipulador ligero y un efector final específico para la recogida de muestras. El sistema incorporará sensorización ambiental, control embarcado y teleoperación avanzada. El trabajo aborda la definición de requisitos funcionales, operativos y de integración, incluyendo indicadores de precisión de manipulación, trazabilidad, robustez y seguridad operativa. Se diseñará y prototipará un manipulador de bajo peso, optimizado para su integración en una plataforma cuadrúpeda, capaz de adquirir muestras líquidas y superficiales en condiciones controladas. El sistema integrará electrónica auxiliar para la adquisición de variables ambientales y un registro estructurado de datos de misión. Asimismo, se desarrollará una arquitectura de control embarcada que integre locomoción, manipulación, sensorización y registro de datos. La teleoperación permitirá visualización en tiempo real, monitorización del sistema y gestión de alarmas. Como línea adicional de I+D, se implementará una celda experimental para capturar demostraciones y evaluar técnicas de aprendizaje por demostración, orientadas a asistir la manipulación, mejorar la resiliencia y avanzar hacia una automatización parcial de las tareas. Los resultados esperados permitirán disponer de plataformas robóticas operativas en entorno controlado, validadas en movilidad, manipulación, toma de muestras, teleoperación y trazabilidad, contribuyendo a reducir la exposición del personal y a mejorar la respuesta ante incidentes químico-biológicos en defensa, seguridad y emergencia civil.

Agradecimientos: Proyecto PRISMA-D. Plataforma multisensorial inteligente para la detección de contaminantes y amenazas químico-biológicas en matrices complejas. Financiado por IVACE+i y la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Palabras clave: Amenazas químico-biológicas, Aprendizaje por demostración, Detección de contaminantes, Percepción multimodal, Sistemas robóticos adaptativos, Teleoperación.

239 – Caracterización experimental del impacto de dispositivos omnidireccionales de proyección de agua contra IED mediante deformación de blancos metálicos

Autores: Ródenas García, José Francisco[1]; Oton-Martinez, Ramón A.[2]; Sancho Val, Joaquín[3]; Francisco Ortiz, Óscar de[4]; Martínez de Baños Martínez de Morentin, M.ª Lourdes[3]; Pascual Aranzana, Javier[3]

Resumen. Los dispositivos de proyección de agua impulsados por explosivo constituyen una solución eficaz y de bajo riesgo para la neutralización de artefactos explosivos improvisados (IED), al permitir la interrupción de sus componentes críticos sin provocar la iniciación del IED y sin generar fragmentación secundaria. En trabajos previos, se ha abordado el diseño y la optimización de un dispositivo omnidireccional pensado para su fabricación mediante impresión 3D, mediante metodologías experimentales basadas en diseño de experimentos (DoE) y metodología de superficie de respuesta (RSM), empleando como variable de respuesta la velocidad del frente de agua proyectada, medida mediante técnicas de imagen a

[1] Cuerpo Nacional de Policía (CNP).
[2] Centro Universitario de la Defensa – Academia General del Aire.
[3] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.
[4] Universidad Politécnica de Cartagena.

alta velocidad. No obstante, la elevada variabilidad en la configuración y materiales de los IED dificulta la correlación directa entre la velocidad del agua y el efecto real de neutralización, lo que motiva la necesidad de definir una métrica experimental más representativa y estandarizada del efecto mecánico del impacto. Para ello, se ha realizado una nueva campaña experimental en la que se estudia la deformación de una lámina de acero de 0,5 mm de espesor debida al impacto del frente de agua. Las chapas se fijaron de forma reproducible mediante un bastidor rígido, asegurando condiciones de contorno constantes entre ensayos. Tras cada detonación, las láminas deformadas fueron digitalizadas mediante un sistema de escaneado tridimensional de alta precisión, obteniéndose una nube de puntos que representa la deformación espacial completa. Estos datos fueron procesados mediante *software* matemático para extraer como variables de respuesta la deformación máxima y la deformación media. El análisis experimental se llevó a cabo siguiendo un procedimiento DoE–RSM, permitiendo estimar los efectos principales, interacciones y términos cuadráticos de los factores de diseño sobre las variables de deformación. Los resultados muestran que la deformación inducida en la chapa metálica depende de manera significativa de los parámetros geométricos y energéticos del dispositivo, identificándose tendencias análogas, pero no idénticas a las observadas cuando la variable de respuesta era la velocidad del agua. El análisis estadístico permitió cuantificar la contribución de cada factor (a saber: diámetro del dispositivo, cantidad de explosivo, distancia y densidad del líquido) y sus interacciones, definiendo regiones óptimas de diseño. Esta nueva aproximación constituye un avance significativo hacia la evaluación objetiva de la eficacia real de estos dispositivos y su capacidad de neutralización, reforzando su aplicabilidad operativa en el ámbito de la defensa y la seguridad.

Palabras clave: Deformación de blancos metálicos, Dispositivos omnidireccionales, Neutralización de IED, Proyección de agua impulsada por explosivo.

274 – Sistema GPR multiestático embarcado en UAV para la detección de minas terrestres y artefactos explosivos improvisados

Autores: Alegría Díaz, Pablo[1]; Hoyo Vijande, Alejandro del[1]; Álvarez López, Yuri[1]; Laviada Martínez, Jaime[1]; Las Heras Andrés, Fernando[1]

Resumen. Las minas terrestres y los artefactos explosivos improvisados (IED) suponen una gran amenaza para el personal militar y civil, siendo una de las principales causas de bajas de las fuerzas europeas durante las operaciones. En el marco del proyecto europeo «Threats Identification by Collaborative vehicles for Human lifesaving against Explosives» (TICHE), financiado por el Fondo Europeo de Defensa (EDF), la Universidad de Oviedo ha desarrollado un georradar (GPR) multiestático embarcado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para detectar y geolocalizar este tipo de amenazas evitando el contacto con el suelo. La principal ventaja de este enfoque en comparación con otras tecnologías como los magnetómetros o los detectores de metales es la capacidad para detectar tanto los explosivos metálicos como los no metálicos. El GPR funciona como un radar de apertura sintética (SAR), utilizando el UAV como plataforma para escanear el terreno y un sistema de posicionamiento Real Time Kinematic (RTK) que permite combinar

[1] Universidad de Oviedo.

coherentemente las medidas tomadas de la señal reflejada en los distintos elementos del entorno para generar imágenes electromagnéticas 3D de la región escaneada. Además, gracias al sistema de posicionamiento RTK, las amenazas detectadas se pueden localizar con una precisión de pocos centímetros. En este trabajo, se presenta un prototipo basado en una configuración multiestática para transmitir y recibir señales desde diferentes posiciones a lo largo del eje perpendicular a la dirección de vuelo del UAV, comparándolo con un prototipo monoestático que únicamente cuenta con una antena transmisora y una antena receptora. La arquitectura multiestática permite escanear una franja de terreno más ancha que la monoestática y, por tanto, cubrir una misma área con un menor número de barridos. Otra ventaja de la arquitectura multiestática es que la reducción en el tiempo de escaneo permite inspeccionar un mayor número de pistas con una única batería y barrer áreas considerablemente mayores que su contraparte monoestática, mejorando de forma sustancial la eficiencia de escaneo. Con respecto a arquitecturas multiestáticas previas, en este desarrollo se ha optimizado tanto la posición de las antenas como la estrategia de conmutación entre canales de medida para maximizar la capacidad de escaneo.

Palabras clave: Detección de artefactos explosivos improvisados (*Improvised Explosive Devices* - IED), Detección de minas terrestres, Georradar (*Ground-Penetrating Radar* - GPR), Radar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR), Vehículo aéreo no tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle* - UAV).

10.2
Defensa NRBQ

11 – Metodología sintética y purificación de compuestos relacionados con la lista S1.A.13 de la Convención sobre las Armas Químicas (CAQ)

Autores: Botella Serrano, Ignacio[1]; Gómez-Caballero, Esther[1]; Sierra, Miguel Ángel[2]

Resumen. Los agentes de guerra química (CWA) son sustancias químicas tóxicas; pueden causar lesiones, incapacidad temporal, irritación sensorial e incluso la muerte, por su acción química en personas o animales. Estas sustancias están sujetas a una regulación muy estricta tal y como marca la Convención sobre la Prohibición del desarrollo, producción, almacenamiento y el empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción. En el siglo XXI, los agentes Novichok, pertenecientes a la denominada Serie-A, de los que se tenía constancia de su existencia desde la década de los noventa, han tomado relevancia tras su uso en intentos de asesinato a opositores del Gobierno ruso como los Skripal (Reino Unido) (2018) y Alexei Navalny (2020). A raíz de estos incidentes, se modificó el anexo de sustancias químicas de la CAQ para incluir este tipo de compuestos en tres nuevas listas S1.A.13, S1.A.14 y S1.A.15. Este hecho ha motivado

[1] INTA.
[2] Universidad Complutense de Madrid.

que los laboratorios designados por la OPAQ, entre los que se encuentra el LAVEMA, tengan que poner a punto su metodología de síntesis y análisis para poder identificar este tipo de compuestos tanto en muestras medioambientales como en muestras biomédicas. En este trabajo, se aborda la síntesis y purificación de dieciséis compuestos relacionados con los agentes Novichok pertenecientes a la lista S1.A.13, a partir de tres metodologías sintéticas. Se ha comprobado que el método de síntesis más rápido y el que permite una purificación más sencilla del producto final es el basado en la siguiente ruta sintética Una mezcla de la correspondiente amidina (2) y trietilamina (3), se añade sobre el dicloruro alquilfosfónico (1) disuelto en un disolvente orgánico. Transcurrido el tiempo de reacción con agitación constante, se obtiene el producto de degradación del agente Novichok (4). El crudo de reacción se lava con una disolución acuosa saturada de hidrógeno carbonato sódico (NaHCO3) para eliminar el exceso de trietilamina (3). La síntesis y purificación se sigue mediante HPLC-MS. En paralelo, determina la estructura de los compuestos implicados por RMN (1H, 13C y 31P).

Palabras clave: CWA, Novichok, CAQ, OPAQ.

24 – Arquitectura *hardware* de IA embebida para la detección en tiempo real de amenazas radiológicas y nucleares en el borde táctico

Autor: Sotirios Logothetis, Agamemnon[1]

Resumen. La detección y clasificación de amenazas radiológicas y nucleares (RN) en entornos operacionales representa un desafío crítico para las fuerzas de defensa y seguridad modernas. Una vigilancia RN eficaz requiere la capacidad de procesar datos espectrales complejos en tiempo real, a través de redes de sensores distribuidas, bajo estrictas restricciones SWaP-C, y en entornos donde la conectividad con infraestructuras centralizadas no puede garantizarse. Los enfoques existentes han dependido en gran medida de arquitecturas de procesamiento centralizado que introducen latencia, dependencia del ancho de banda y vulnerabilidad en escenarios operacionales contestados o degradados. Este trabajo presenta el desarrollo de una arquitectura *hardware* de IA embebida para la detección en tiempo real de amenazas RN y el análisis espectral, desarrollada en el marco del proyecto ARGUS (Misiones – Seguridad y Defensa). Basándose en más de una década de experiencia en programas NRBQ,

[1] Business Development Manager.

incluyendo la participación en REWARD (FP7 Seguridad) y NEST (H2020 Sociedades Seguras), la arquitectura propuesta avanza más allá de la integración de sensores hacia la plena propiedad tecnológica de la capacidad de detección RN. La solución integra detectores RN multisensor de nueva generación con *hardware* dedicado a FPGA/ASIC y módulos de aceleración de IA embebida, permitiendo análisis espectral y la discriminación de amenazas en el propio dispositivo, sin dependencia de infraestructuras de computación externas. La arquitectura será validada funcionalmente en TRL 6 en colaboración con instituciones de investigación líderes en microelectrónica. La contribución técnica principal se basa en el desarrollo de dispositivos microelectrónicos que incluyen sensores radiológicos basados en tecnología de semiconductores y el diseño de un procesador de propósito específico (ASIC) con capacidad para la ejecución de modelos IA para el análisis espectral radiológico y el reconocimiento de patrones. Al integrar la inferencia directamente a nivel de sensor, la arquitectura ofrece clasificación de amenazas de baja latencia determinista, reducción de los requisitos de transmisión de datos y operación resiliente en entornos denegados y degradados. El diseño modular soporta la interoperabilidad con plataformas NRBQ más amplias y sistemas de mando y control (C2), habilitando el apoyo a la toma de decisiones en tiempo real para personal de primera intervención y operadores de defensa que gestionan incidentes radiológicos en escenarios urbanos, de infraestructuras críticas y de combate. Los resultados demuestran que la IA embebida acelerada por *hardware* representa una vía viable y operacionalmente realista hacia capacidades soberanas de detección NRBQ de nueva generación, reforzando la autonomía nacional y europea en un dominio tecnológico de crítica importancia estratégica.

Palabras clave: NRBQ, Detección, Clasificación, Inteligencia artificial, IA, SWaP-C, Embebido, Acelerador, Autonomía, Defensa, Seguridad, Amenazas RN, Radiológicas, Nucleares, Baja latencia, FPGA, ASIC.

41 – RAPID-VAC: plataforma nacional de vacunas de RNA para respuesta rápida y escalable frente a amenazas biológicas de interés para la defensa en salud

Autores: Martínez Oliván, Juan[1]; Giménez Warren, Javier[1]; Broset Blasco, Esther[1]; Casabona Agudo, Diego[1]; Miguel Samaniego, Diego de[1]; Pérez Herrám, Esther[1]; Mata Lozano, Elena[1]

Resumen. Preferencia presentación oral. Los recientes conflictos geopolíticos, junto con la experiencia de la pandemia de COVID-19 y el aumento de amenazas químicas, biológicas, radiológicas y nucleares (NRBQ), han puesto de manifiesto la necesidad de que España refuerce su autonomía estratégica para garantizar una respuesta sanitaria rápida, eficaz y soberana. La aparición de patógenos emergentes, incidentes deliberados o escenarios híbridos con impacto en población civil y fuerzas desplegadas exige capacidades propias que no dependan de terceros países ni de cadenas de suministro vulnerables o inestables. En este contexto, resulta prioritario consolidar una base tecnológica e industrial nacional que asegure el acceso oportuno a herramientas preventivas críticas, reforzando así la resiliencia estructural del sistema de salud pública y su capacidad de respuesta ante crisis. El proyecto RAPID-VAC (MIG-20251046) se

[1] Certest Biotec.

plantea como una respuesta de país a este reto, mediante el desarrollo de una plataforma nacional de vacunas de RNA diseñada para activarse con rapidez y escalarse ante amenazas biológicas de interés para la defensa en salud. El enfoque diferencial de RAPID-VAC reside en la creación de una plataforma autónoma, integral y «ready-to-use» que permita diseñar, desarrollar y evaluar vacunas de RNA en menos de 45 días desde la identificación de un agente biológico, y producirlas en otros 45 días para su uso en humanos. Esta capacidad se basa en las ventajas inherentes de la tecnología de RNA como son la rapidez de rediseño, flexibilidad y escalabilidad frente a plataformas más rígidas, lo que la convierte en una herramienta clave en escenarios donde el tiempo de reacción es crítico y determinante. Más allá del desarrollo tecnológico, RAPID-VAC busca establecer una capacidad nacional real, plenamente controlada y con propiedad intelectual 100 % española. Esto permitiría a España disponer de una infraestructura soberana capaz de generar soluciones vacunales frente a virus, bacterias o toxinas relevantes, reduciendo la dependencia exterior y garantizando la continuidad operativa en situaciones de crisis complejas. El proyecto se articula como una iniciativa cooperativa que integra empresas españolas y organismos públicos de investigación, incluyendo el Instituto de Salud Carlos III. Esta colaboración abarca toda la cadena de valor: desde la vigilancia epidemiológica y el diseño de candidatos hasta la formulación, validación preclínica y escalado de producción, bajo una lógica común de autonomía estratégica. La contribución de RAPID-VAC a la defensa NRBQ es, por tanto, estructural. Supone desarrollar en tiempo de paz una capacidad soberana, dual y escalable que fortalece la protección de la población, la resiliencia del sistema sanitario y la seguridad de las Fuerzas Armadas. En un entorno internacional cada vez más incierto, esta plataforma posiciona a España en una situación de mayor independencia, preparación y capacidad de respuesta frente a amenazas biológicas.

Palabras clave: Autonomía estratégica, Defensa en salud, Amenazas biológicas, NRBQ, Vacunas de RNA, Plataforma nacional, Respuesta rápida, Soberanía tecnológica, Capacidad industrial, Resiliencia sanitaria, Patógenos emergentes, Seguridad nacional, Biotecnología, Preparación pandémica, Salud pública.

42 – Diagnóstico molecular avanzado de despliegue rápido y autonomía industrial: tecnología qPCR de alto multiplexado para defensa en salud

Autores: Martínez Oliván, Juan[1]; Llobet, Laura[1]; Serrano Sevilla, Inés[1]; Iguacel Quintana, Laura[1]; Hamdan, Fadi[1]

Resumen. Preferencia presentación oral. La preparación frente a amenazas biológicas acentuada tras la pandemia de COVID-19 y en un contexto de creciente riesgo NRBQ exige más que poseer capacidad científica. Requiere identificar con rapidez una amenaza, traducir ese conocimiento en herramientas diagnósticas útiles en plazos cortos y disponer de capacidad industrial propia para escalar y producir cuando más se necesitan. Este sigue siendo uno de los principales cuellos de botella ante patógenos emergentes o escenarios con impacto en la defensa, la seguridad y la salud de la población y de efectivos desplegados. En este contexto, el diagnóstico molecular mediante qPCR multiplexada se posiciona como una tecnología clave para la respuesta rápida. Su capacidad para detectar múltiples agentes en una única muestra permite optimizar tiempos, mejorar la precisión y facilitar la toma de decisiones en entornos críticos, incluyendo operaciones en despliegue y salud pública. La diferenciación

[1] Certest Biotec.

entre patógenos con sintomatología similar o la identificación de coinfecciones adquiere un valor estratégico cuando el diagnóstico condiciona la protección de la población y la operatividad de las fuerzas. Certest Biotec presenta una nueva tecnología propia y patentada de qPCR de alto multiplexado, diseñada para aumentar la capacidad de detección simultánea de patógenos y mejorar la resolución entre agentes infecciosos y variantes. Esta tecnología reduce tiempos de diagnóstico, optimiza recursos y permite soluciones más completas en una sola prueba, con impacto directo en vigilancia, triaje y control de brotes, especialmente en entornos con recursos limitados o en despliegue. El desarrollo de esta plataforma se apoya en una sólida base industrial en España, que permite a Certest diseñar, fabricar y escalar soluciones con alto grado de autonomía. La compañía integra kits de qPCR y test rápidos junto con componentes críticos, garantizando rapidez de respuesta y continuidad operativa incluso en disrupciones de suministro. Esta capacidad quedó demostrada durante la pandemia de COVID-19, cuando Certest contribuyó al sostenimiento del diagnóstico en España con desarrollo temprano y producción a gran escala. Actualmente dispone de una capacidad industrial superior a doscientos millones de test anuales, clave cuando no solo es necesario diagnosticar, sino hacerlo con volumen y fiabilidad. La nueva tecnología de alto multiplexado refuerza una propuesta clara: dotar a España de capacidades autónomas para el desarrollo, producción y despliegue rápido de diagnóstico avanzado frente a amenazas biológicas, con aplicación directa en la protección de la población y la seguridad de los efectivos desplegados.

Palabras clave: Diagnóstico molecular avanzado, qPCR multiplexada, Alto multiplexado, Amenazas biológicas, NRBQ, Defensa en salud, Autonomía industrial, Despliegue rápido, Patógenos emergentes, Resiliencia sanitaria, Salud militar, Vigilancia epidemiológica.

82 – Implementación de herramientas de biología computacional e inteligencia artificial en el diseño de un biorreceptor para la identificación de saxitoxina

Autores: García Martínez, Sergio[1]; Peraile Muñoz, Inés[1]; Gil García, Matilde[1]

Resumen. Actualmente, los biosensores son una de las herramientas más extendidas en la detección de agentes biológicos de interés en defensa como es el caso de la saxitoxina. La saxitoxina es una neurotoxina sintetizada por algunas especies de dinoflagelados y cianobacterias, que bloquea reversiblemente los canales de sodio dependientes de voltaje del sistema nervioso. Es considerada tanto como arma biológica como arma química [Lista 1 de la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas (OPAQ)]. Los biosensores utilizan biorreceptores, que son biomoléculas capaces de reconocer y unirse al agente biológico en cuestión, de manera específica. Cuanto más específicos y pequeños sean estos biorreceptores, mayor sensibilidad tendrá el biosensor. Los biorreceptores más comúnmente utilizados son los anticuerpos, dada su gran especificidad. Sin embargo, algunos agentes biológicos tienen poca actividad inmunogénica siendo difícil la obtención de anticuerpos específicos que los reconozcan,

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

como ocurre en el caso de la saxitoxina. Esta situación, junto con el gran tamaño de los anticuerpos, impulsa a la búsqueda de otros biorreceptores más adecuados. En la naturaleza se ha identificado una proteína denominada saxifilina, sintetizada por ciertas especies de anfibios, que es capaz de unirse y secuestrar a la saxitoxina, protegiendo a estos organismos de los efectos nocivos de la toxina. Esta característica hace de la saxifilina un buen candidato como biorreceptor de la saxitoxina. Sin embargo, su uso en biosensores de campo se ve comprometido por su limitada estabilidad térmica y por su gran tamaño molecular (90-100 KDa), que reduce el número de biorreceptores inmovilizados en el biosensor, disminuyendo así la sensibilidad. A través del uso de herramientas y *softwares* de biología computacional, bioinformática estructural e inteligencia artificial es posible el diseño *in silico* de un biorreceptor, basado en la miniaturización de esta proteína, que conserve la región encargada de reconocer y unirse a la saxitoxina de manera eficaz, pero con un tamaño lo suficientemente reducido como para poder ser acoplado a un biosensor, aumentando así su sensibilidad. En este sentido, el Área de Defensa Biológica, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), está trabajando en el diseño de un biosensor para el diagnóstico *on-site* de saxitoxina que utilice un biorreceptor basado en saxifilina. Para ello, se ha diseñado computacionalmente un derivado de dicha saxifilina, aproximadamente siete veces más pequeño que la saxifilina original, lo que supondría un aumento considerable de la sensibilidad.

Palabras clave: Saxitoxina, Biosensor, Saxifilina, Biorreceptor, Biología computacional, Bioinformática estructural.

92 – Plasma frío como tecnología portátil para la descontaminación de aguas en aplicaciones duales defensa-civil

Autores: Ruzafa Silvestre, Carlos[1]; Serrano Martínez, Víctor[1]; Maestre López, María Isabel[1]; Bertazzo, Marcelo[1]; Romero Sánchez, María Dolores[1]

Resumen. La presencia de contaminantes químicos persistentes y microorganismos patógenos en aguas constituye un desafío creciente tanto en el ámbito de la defensa como en entornos civiles. Compuestos orgánicos emergentes con actividad disruptora endocrina, como los bisfenoles, junto con sustancias altamente persistentes como los compuestos perfluoroalquilados (PFAS), así como bacterias, virus y otros agentes biológicos, presentan una elevada resistencia a los tratamientos convencionales. Esta problemática adquiere especial relevancia en escenarios donde existe una necesidad de tratamiento de aguas en campo, sin acceso a infraestructuras centralizadas, como operaciones desplegadas, situaciones de emergencia o entornos remotos. En este contexto, el desarrollo de tecnologías avanzadas, portátiles y de aplicación *in situ* resulta clave para mejorar la capacidad de respuesta ante riesgos químicos y biológicos. El plasma frío atmosférico emerge como una solución innovadora con alto potencial, gracias a su capacidad para generar especies reactivas

[1] INESCOP. Instituto Tecnológico del Calzado. Elda-Alicante.

(radicales libres, especies reactivas de oxígeno y nitrógeno) capaces de degradar compuestos orgánicos complejos y de inactivar microorganismos de forma eficiente. Su funcionamiento sin necesidad de añadir reactivos químicos adicionales, junto con su versatilidad y rapidez de acción, lo convierte en una alternativa sostenible y adaptable a distintos escenarios operativos. La presente comunicación analiza la viabilidad del plasma como tecnología portátil para aplicaciones duales, centrándose en el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos emergentes y agentes microbiológicos. Se abordan aspectos relacionados con los mecanismos de degradación e inactivación y la eficiencia del proceso frente a distintos tipos de contaminantes. Estas características, junto con la rapidez de tratamiento y la posibilidad de aplicación directa sobre el medio sin etapas complejas de preparación, hacen del plasma una herramienta especialmente adecuada para escenarios de despliegue rápido con carácter dual. Su uso resulta de interés tanto en operaciones de defensa como en situaciones de emergencia civil, como catástrofes naturales, crisis sanitarias, episodios de contaminación accidental o incidentes NBQ, donde la capacidad de respuesta inmediata es crítica. Los primeros resultados obtenidos refuerzan el papel del plasma frío como herramienta estratégica para la mitigación de riesgos asociados a contaminantes persistentes y agentes biológicos, contribuyendo a mejorar la resiliencia y la autonomía operativa en contextos tanto militares como civiles.

Agradecimientos: ayudas destinadas a Centros Tecnológicos de Excelencia «Cervera» convocatoria 2025. Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2024-2027. Proyecto ATALAYA. CER-20251018.

Palabras clave: Plasma, Descontaminación agua, Contaminante químico y biológico.

122 – Caracterización fisicoquímica y farmacotécnica de la obidoxima como principio activo estratégico en la fabricación industrial de un antídoto frente a agentes organofosforados

Autores: Ruiz Cuesta, María Dolores[1]; Blasco Barbero, Alejandro[1]; Sánchez Raya, María[2]; Martínez Alonso, Borja[2]; Pardo Laurel, Hugo[2]; Guarnizo Herrero, Víctor[2]; Peña Fernández, Ángeles[2]; Torrado Durán, Guillermo[2]; Torres Pabón, Norma Sofía[2]

Resumen. Los compuestos organofosforados empleados como plaguicidas y como agentes nerviosos de uso bélico, constituyen una amenaza actual para la salud pública, la defensa y la seguridad nacional. Su toxicidad por inhibición de la acetilcolinesterasa provoca la acumulación de acetilcolina y el desencadenamiento de un cuadro caracterizado por insuficiencia respiratoria y fallo multiorgánico. En este contexto, la obidoxima es un antídoto de interés estratégico, capaz de reactivar la enzima fosforilada, y forma parte de las contramedidas médicas contempladas en protocolos de respuesta frente a incidentes NRBQ. La disponibilidad de

[1] Centro Militar de Farmacia de la Defensa.
[2] Universidad de Alcalá.

antídotos con la alta calidad requerida en la industria farmacéutica pasa por la adecuada selección de proveedores que garanticen consistencia en las especificaciones de sus envíos. La presente comunicación propone la caracterización integral de la obidoxima como herramienta crítica para asegurar la disponibilidad, intercambiabilidad y fiabilidad de proveedores del principio activo, en el contexto del desarrollo y escalado industrial de un antídoto destinado a situaciones de emergencia operativa. El carácter innovador de esta comunicación es la integración de los atributos fisicoquímicos y farmacotécnicos de la obidoxima, un bis piridinio cuaternario altamente polar que por sus dos grupos oxima (=N–OH), presenta tres isómeros EE, EZ y ZZ con distinta capacidad reactivadora de la acetilcolinesterasa. Desde el punto de vista farmacéutico y regulatorio, el perfil isomérico se considera un atributo crítico de calidad, ya que lotes con pureza global similar pueden diferir en eficacia clínica si su proporción de isómeros no es equivalente. Este trabajo es un recurso que fortalece los procesos de logística de adquisición de materiales requeridos dentro de la transferencia tecnológica desde los primeros ensayos de formulación hasta la definición de la metodología elegida como la más apropiada para el proceso farmacéutico industrial en respuesta a las necesidades en un contexto de emergencia por accidentes o amenazas frente a contaminación por compuestos organofosforados. Sobre esa base, la metodología analítica determina los parámetros útiles para la selección de proveedores, tales como especificidad del método, capacidad de separación, reproducibilidad, sensibilidad y aptitud para detectar variabilidad estructural o impurezas con impacto potencial en la calidad de la forma farmacéutica final. En conjunto, la propuesta refuerza la base científico-técnica para decisiones de aprovisionamiento de la obidoxima con criterios de seguridad, calidad y preparación proactiva ante incidentes químicos.

Palabras clave: Obidoxima, Organofosforados, Antídotos, Proveedores, Isómeros.

162 – ATALAYA: Red de Excelencia para el Fortalecimiento de Capacidades Tecnológicas en Detección y Protección NRBQ frente a Amenazas Asimétricas

Autor: Sánchez, Carles[1]

Resumen. La Red de Excelencia ATALAYA surge como una respuesta integral a los desafíos de seguridad y defensa en el ámbito de las amenazas nucleares, radiológicas, biológicas y químicas (NRBQ), con especial énfasis en los escenarios asimétricos y de alta incertidumbre operativa. El objetivo de esta iniciativa es el desarrollo de tecnologías disruptivas que permitan mitigar los riesgos derivados del uso de agentes tóxicos por parte de actores no convencionales. La red integra las capacidades de cinco centros tecnológicos punteros: ITENE, GAIKER, NAITEC, LUREDERRA e INESCOP, articulando un ecosistema orientado a tecnologías duales de alto impacto. El programa se estructura en tres pilares: 1) Tecnologías DIM (detección, identificación y monitorización); 2) Protección y descontaminación y 3) Inteligencia artificial aplicada. En primer lugar, las tecnologías DIM basadas en sensórica avanzada miniaturizada, que combinan por una parte biosensores genéticos portátiles

[1] ITENE.

(tecnologías LAMP, CRISPR-Cas) con plataformas electroquímicas, y, por otra parte, sensores fotónicos integrados, lo que permite una detección rápida y específica a remoto. La integración de CRISPR en biosensores aporta elevada sensibilidad y especificidad molecular, facilitando la detección temprana de amenazas biológicas emergentes. Además de sistemas ópticos PoC y nanoestructuradas para la detección de gases frente amenazas químico-tóxicas. En segundo lugar, ATALAYA impulsa tecnologías de protección y descontaminación mediante materiales avanzados, incluyendo recubrimientos biobasados, superficies funcionales y tratamientos mediante plasma atmosférico [6], orientados a la neutralización de agentes persistentes, dotando a textiles y carcasas de equipos militares propiedades antimicrobianas. El tercer pilar aborda la integración digital mediante inteligencia artificial, con modelos de predicción de riesgos NRBQ basados en datos multisensoriales georreferenciados. Estos sistemas permiten el análisis en tiempo real y el apoyo a la toma de decisiones operativas [7]. Un elemento diferencial es la integración de sensores en plataformas no tripuladas (UAV/UGV), habilitando operaciones remotas en entornos hostiles con transmisión cibersegura de datos. Esta convergencia tecnológica permite una vigilancia continua y una respuesta rápida ante incidentes NRBQ. La red ATALAYA no solo busca la excelencia científica, sino también garantizar la soberanía tecnológica nacional y la transferencia efectiva de soluciones al tejido industrial de la defensa. El enfoque dual de las tecnologías desarrolladas permite además su aplicación en seguridad civil, emergencias sanitarias y protección de infraestructuras críticas. Este trabajo colaborativo permite alcanzar niveles de madurez tecnológica (TRL) altos, posicionando a España como un referente en la investigación europea en defensa NRBQ.

Palabras clave: Seguridad NRBQ, Biosensores, Descontaminación, Inteligencia artificial, Tecnologías duales.

168 – Avances en biosensado genético y fotónico para la detección temprana de amenazas biológicas: una aproximación desde la Red ATALAYA

Autor: Sánchez, Carles[1]

Resumen. La detección rápida y precisa de agentes biológicos de alto riesgo en escenarios críticos es una prioridad ineludible para las fuerzas de defensa y seguridad. Los métodos convencionales de laboratorio, aunque fiables, resultan lentos y dependen de infraestructuras complejas, lo que limita la capacidad de respuesta inmediata. En este contexto, el proyecto ATALAYA desarrolla una nueva generación de biosensores diseñados para operar de forma portátil (*Point-of-Care*) y remota, mejorando drásticamente la monitorización de amenazas biológicas. La investigación se centra en dos metodologías disruptivas. En primer lugar, se desarrollan biosensores electroquímicos basados en la combinación de amplificación isotérmica de ácidos nucleicos (LAMP) y la tecnología CRISPR-Cas. Este enfoque permite identificar marcadores genéticos de virulencia y resistencia a antimicrobianos con alta especificidad, eliminando la necesidad de ciclos térmicos complejos y proporcionando una señal cuantificable en pocos minutos sobre electrodos serigrafiados (SPE) de bajo coste.

[1] ITENE.

Para potenciar la señal y mejorar los límites de detección, se utilizan nano-óxidos metálicos y materiales biohíbridos que optimizan la inmovilización de los biorreceptores. En segundo lugar, se exploran sistemas de transducción fotónica basados en chips integrados con estructuras de anillos resonantes y guías de onda corrugadas. Estos sensores ópticos permiten una monitorización continua y sin marcaje (*label-free*), detectando cambios ínfimos en el índice de refracción ante la interacción con dianas biológicas. Una de las innovaciones clave será la integración de estos sensores en plataformas aéreas/terrestres no tripuladas (UAV/UGV), lo que permite la exploración remota de aire y agua en zonas de difícil acceso o altamente contaminadas, minimizando el riesgo para el personal. La prospectiva de ATALAYA apunta hacia sistemas multianalito capaces de detectar patógenos como *Clostridium botulinum*, *Staphylococcus aureus* o *Bacillus anthracis* en tiempo real, con una reducción prevista de falsos positivos superior al 20 % respecto a las tecnologías actuales. Estos avances, unidos al *edge computing*, permite el procesamiento descentralizado de datos, mejorando la latencia de respuesta y la toma de decisiones en tiempo real, fundamental para la protección de la población civil y las fuerzas del estado ante amenazas biológicas emergentes.

Palabras clave: Genosensores electroquímicos, Detección rápida, CRISPR-Cas, LAMP, Fotónica, *Edge computing*.

174 – *Pipeline* de inteligencia artificial para el diseño de novo de enzimas descontaminantes de agentes NRBQ

Autores: Abenza, Eduardo[1]; Caruana Santiago, Álvaro[1]

Resumen. El diseño de enzimas capaces de degradar agentes químicos de guerra (CWA) ha dependido tradicionalmente de la evolución dirigida experimental, un proceso costoso que requiere múltiples rondas de mutagénesis y selección en laboratorio, con ciclos de meses a años. En este trabajo, se presenta un *pipeline* computacional *end-to-end* de inteligencia artificial para el diseño de novo de enzimas descontaminantes, originalmente desarrollado en el proyecto NanomatIA para enzimas celulolíticas y adaptado aquí al dominio de defensa NRBQ. El *pipeline* integra cuatro módulos: (1) generación de secuencias candidatas mediante modelos de lenguaje proteico condicionados por número EC, entrenados con datos de fosfotriesterasas (PTE, EC 3.1.8.1), organofosforado hidrolasas (OPH) y lacasas (EC 1.10.3.2) con actividad documentada contra simulantes de CWA; (2) predicción de estructura tridimensional, incluyendo evaluación de calidad estructural (pLDDT > 70) y conservación del sitio activo (residuos His, Asp, Zn^{2+} catalíticos); (3) optimización de termoestabilidad mediante predicción de mutaciones estabilizantes ($\Delta\Delta G < 0$) y modelos

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.

de *machine learning*, con objetivo de Tm > 70 °C para operación en condiciones de campo y (4) validación funcional mediante *docking* molecular enzima-sustrato, utilizando simulantes accesibles (DMNP, DMMP, CEES) como ligandos de referencia, con análisis de energías de *binding* y poses de interacción en el sitio activo. El *pipeline* incorpora análisis de novedad (MMseqs2, *clustering*) para garantizar que las secuencias generadas son genuinamente nuevas y no meros homólogos de enzimas conocidas. Se presenta una prueba de concepto computacional sobre la familia de fosfotriesterasas, comparando las afinidades de *binding* predichas para variantes diseñadas frente a enzimas *wild-type* de referencia (PTE de Brevundimonas diminuta). Se discute la transferibilidad de la metodología a otras familias enzimáticas relevantes para defensa NRBQ (lacasas para vesicantes, haloperoxidasas para agentes clorados) y la ruta de validación experimental necesaria para la transición de predicción computacional a ensayo bioquímico, incluyendo la integración de biocatalizadores en soportes textiles para equipos de protección individual (línea ETID 10.2.4).

Palabras clave: Diseño de enzimas, Inteligencia artificial, Modelos de lenguaje proteico, Fosfotriesterasa, *Docking* molecular, Agentes químicos de guerra, Defensa NRBQ, Diseño de novo.

176 – Monitorización inteligente de filtros basados en *metal-organic frameworks* para protección colectiva NRBQ: marco conceptual de gemelo digital con predicción de vida útil residual

Autores: Abenza, Eduardo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[2]

Resumen. Los sistemas de protección colectiva NRBQ emplean filtros de carbón activado cuya capacidad de adsorción se agota progresivamente sin que el personal desplegado disponga de información sobre el estado real del medio filtrante, generando un riesgo operativo crítico de exposición inadvertida a agentes NRBQ. La ETID 2026 identifica esta carencia en su línea 10.2.5, demandando «indicadores que monitoricen y alerten del agotamiento o saturación de los filtros para conocer su tiempo de vida útil o del grado de funcionamiento de los equipos». La línea se enmarca, junto con 10.2.3 (descontaminación NRBQ), en el objetivo de control integral de la amenaza. Los *metal-organic frameworks* (MOF), reconocidos con el Premio Nobel de Química 2025, ofrecen prestaciones superiores a los

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.
[2] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S.L – Inteligencia artificial. Disponible en: https://www.hi-iberia.es/artificial-intelligence.

adsorbentes convencionales —áreas superficiales de 1000-10 000 m²/g frente a 500-1500 m²/g del carbón activado— y eficiencias de degradación catalítica >90 % en <5 minutos para agentes nerviosos tipo G y V. A diferencia del carbón activado, que retiene contaminantes por adsorción pasiva, los MOF degradan catalíticamente los agentes mediante nodos metálicos (sitios ácidos de Lewis), introduciendo modos de fallo distintos a nivel cualitativo —pérdida de cristalinidad, envenenamiento de nodos, colapso de poros— ausentes en adsorbentes convencionales. No obstante, los MOF sufren saturación de sitios activos y degradación estructural (TRL 3-4 en regeneración), y la literatura se centra casi exclusivamente en la capacidad inicial, no en el seguimiento del ciclo de vida operacional. Este trabajo propone un gemelo digital para la monitorización en tiempo real de filtros MOF en protección colectiva, articulado en cuatro componentes: (i) un modelo de degradación basado en aprendizaje automático, entrenado con datos de envejecimiento acelerado que correlacionen variables indirectas —caída de presión diferencial, impedancia eléctrica del lecho, temperatura y humedad— con el grado de saturación; (ii) un módulo de predicción de vida útil residual (RUL) con cuantificación de incertidumbre, adaptado de mantenimiento predictivo industrial; (iii) alertas graduales (verde-ámbar-rojo) integrables en el sistema de protección colectiva o en el equipo del operador (línea ETID 10.2.4) y (iv) un bucle de retroalimentación para refinar el modelo con datos operacionales reales. Se discuten las arquitecturas de aprendizaje automático más adecuadas —LSTM, *transformers* temporales y GNN para capturar la topología del MOF— y las limitaciones actuales, incluyendo la escasez de datos de degradación a largo plazo y la necesidad de validación con agentes reales.

Palabras clave: *Metal-organic frameworks* (MOF), Protección colectiva NRBQ, Monitorización de filtros, Vida útil residual (*Remaining Useful Life*), Gemelo digital, Aprendizaje automático, Mantenimiento predictivo, Defensa y seguridad.

178 – Diseño computacional de *metal-organic frameworks* multifuncionales para neutralización simultánea de amenazas NRBQ mediante optimización multiobjetivo

Autores: Abenza, Eduardo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[2]

Resumen. La doctrina de defensa NRBQ exige capacidad de respuesta simultánea frente a agentes químicos, biológicos, radiológicos y nucleares. Tras el Nobel de Química 2025 (Yaghi, Kitagawa, Robson), el campo de los *metal-organic frameworks* (MOF) experimenta una aceleración sin precedentes. Sin embargo, los MOF actuales se diseñan para neutralizar un único tipo de amenaza: los Zr-MOF (UiO-66, MOF-808) degradan agentes nerviosos como somán con eficiencias superiores al 90 % en menos de cinco minutos mediante hidrólisis catalítica en nodos Zr(IV); los Ag-MOF y Cu-MOF exhiben actividad antimicrobiana por liberación iónica, pero presentan escasa capacidad frente a agentes químicos de guerra y los MOF funcionalizados con grupos sulfato u oxalato (MOF-808-SO4, MOF-808-C2O4) capturan radionucleidos como estroncio (hasta 206 mg/g) y uranio (99,9 % de remoción) mediante intercambio

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.
[2] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L. – Inteligencia artificial· Disponible en: https://www.hi-iberia.es/artificial-intelligence.

iónico, un mecanismo incompatible con la catálisis ácida de Lewis requerida para organofosforados. Esta especificidad monoamenaza constituye una limitación operativa crítica: en escenarios NRBQ reales, las fuerzas desplegadas necesitan materiales que integren múltiples funcionalidades en un mismo soporte. Este trabajo propone un *framework* computacional de optimización multiobjetivo para el diseño racional de MOF multifuncionales capaces de abordar simultáneamente las cuatro categorías de amenaza NRBQ. La arquitectura combina tres componentes: (1) redes neuronales de grafos cristalinos (CGCNN) para la predicción de propiedades a partir de la topología del MOF, aprovechando bases de datos de más de 40 000 estructuras experimentales y 323 000 hipotéticas con aceleraciones de 10 000-100 000× respecto a simulaciones ab initio; (2) un módulo generativo tipo *transformer* (MOFGPT) que produce candidatos topológicamente válidos y sintetizables, dirigidos por funciones de recompensa específicas para cada amenaza y (3) un optimizador de Pareto multicriterio que maximiza de forma simultánea la velocidad de hidrólisis de CWA, la actividad antimicrobiana, la capacidad de adsorción de radionucleidos y la estabilidad hidrolítica, identificando el frente de soluciones no dominadas. Una estrategia de transfer learning (preentrenamiento DFT, ajuste fino con simulantes) permite superar la escasez de datos con agentes reales. La contribución principal es la formulación explícita de la multifuncionalidad NRBQ como problema de optimización de Pareto en el espacio de diseño de MOF, un planteamiento ausente en la literatura. El *framework* resultante se alinea con tres pilares de la ETID 2026: descontaminación universal sin líquidos corrosivos (10.2.3), EPI inteligente con capacidad autodescontaminante multifuncional (10.2.4) y protección colectiva mediante filtración avanzada (10.2.5). Se discute la aplicabilidad del *framework* al catálogo CoRE MOF (>40 000 estructuras) y se identifican las rutas de validación experimental necesarias.

Palabras clave: *Metal-organic frameworks* multifuncionales, NRBQ, Defensa NRBQ, Optimización multiobjetivo, Redes neuronales de grafos (GNN), Aprendizaje por refuerzo, Diseño computacional de materiales, Descontaminación catalítica, Frente de Pareto.

179 – *Transfer learning* multifidelidad para predicción del rendimiento de *metal-organic frameworks* en defensa NRBQ: de datos de simulantes a agentes químicos de guerra reales

Autores: Abenza Eduardo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[2]

Resumen. Los *metal-organic frameworks* (MOF) constituyen la familia de materiales más prometedora para la descontaminación catalítica de agentes químicos de guerra (CWA). Los Zr-MOF —UiO-66, MOF-808, NU-1000— degradan organofosforados como somán y VX con eficiencias superiores al 90 % en menos de cinco minutos. Sin embargo, la práctica totalidad de los datos experimentales publicados se obtiene con simulantes (DMNP, CEES), ya que los agentes reales —sarín, VX, mostaza de azufre— exigen instalaciones de nivel 3-4 y están sujetos a restricciones de clasificación. Este desajuste entre dominios, que denominamos *reality gap*, impide validar modelos de aprendizaje automático entrenados con simulantes cuando se requieren predicciones sobre agentes reales.

[1] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.
[2] HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L. – Inteligencia artificial. Disponible en: https://www.hi-iberia.es/artificial-intelligence.

El presente trabajo propone un pipeline de transfer learning multifidelidad para cerrar ese gap sin datos experimentales con agentes reales. El pipeline comprende cuatro etapas: (i) preentrenamiento de Graph Neural Networks (GNN) sobre la base QMOF (14 000 MOF con propiedades DFT), donde la arquitectura CGCNN alcanza $R^2 = 0{,}876$ en predicción de *band gaps*; (ii) *fine-tuning* supervisado con datos de simulantes procedentes de un corpus creciente de estudios experimentales publicados, incluyendo cinéticas de hidrólisis y capacidades de adsorción; (iii) adaptación de dominio mediante descriptores fisicoquímicos conocidos de los agentes reales (electronegatividad del centro electrofílico, longitud de enlaces P-F, P-S y C-S, coeficiente de partición log P) sin experimentación clasificada y (iv) cuantificación de incertidumbre (*ensembles* bayesianos y calibración conformal) para acotar la confianza de cada predicción transferida. El enfoque se sustenta en evidencia reciente: estudios análogos en otros dominios moleculares reportan mejoras de hasta un orden de magnitud respecto al entrenamiento desde cero con menos de cien ejemplos, y las técnicas multifidelidad reducen la necesidad de datos de alta fidelidad. La contribución principal es la formulación de la adaptación simulante-a-agente-real como problema de *domain shift*, junto con un protocolo de validación cruzada entre familias químicas (nerviosos, vesicantes, tóxicos industriales) que permite estimar el error de transferencia sin datos clasificados. La metodología es aplicable a los tres pilares de defensa NRBQ de la ETID 2026: selección de MOF óptimos para descontaminación (pilar 10.2.3), diseño de textiles con MOF catalíticos para equipos de protección individual (pilar 10.2.4) y filtros MOF para protección colectiva (pilar 10.2.5). Al reducir la dependencia de ensayos con agentes reales, el *framework* acorta los ciclos de certificación de materiales NRBQ y contribuye a la autonomía en la evaluación de materiales NRBQ en un ámbito restringido por razones de seguridad nacional.

Palabras clave: *Metal-organic frameworks* (MOF), *Transfer learning*, Agentes químicos de guerra, Simulantes NRBQ, *Graph neural networks*, Descontaminación catalítica, Defensa NRBQ, Descontaminación.

195 – Desarrollo galénico de formulaciones semisólidas frente a agentes físicos y nucleares

Autores: Leal de la Encina, Javier[1]; Guarnizo Herrero, Víctor[2]; Martínez Alonso, Borja[3]; Pardo Laurel, Hugo[1]; Torres Pabón, Norma [2]; Juberías Sánchez, Antonio[4]

Resumen. Las amenazas NRBQ tanto en el ámbito militar como civil abarcan una amplia diversidad de agentes, desde sustancias químicas altamente tóxicas hasta microorganismos patógenos y radionúclidos persistentes en el entorno. La heterogeneidad en su composición, mecanismos de acción, estabilidad y comportamiento en distintas matrices, así como su capacidad de penetración cutánea o inhalatoria, hace imprescindible el desarrollo de estrategias específicas y eficaces para la descontaminación de personal expuesto. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar y evaluar diferentes formulaciones semisólidas de tipo detergente destinadas a la eliminación de contaminantes representativos de amenazas nucleares, biológicas, radiológicas y químicas (NBRQ). Para ello, tras una amplia búsqueda bibliográfica y estudio de mercado,

[1] Estudiante de doctorado.
[2] Profesor universitario.
[3] Estudiante posdoctoral.
[4] Profesor honorífico, Escuela Militar de Sanidad.

se diseñaron racionalmente dos formulaciones (A y B) compuestas por diferentes agentes tensioactivos y excipientes en concentraciones variables, optimizadas en función de su capacidad de arrastre y compatibilidad cutánea. Las formulaciones fueron creadas eligiendo excipientes conocidos y de fácil adquisición para que, en caso de evento catastrófico, estos puedan encontrarse con facilidad y así poder ser formulados en las cantidades pertinentes. Ambas formulaciones fueron caracterizadas mediante parámetros fisicoquímicos relevantes, incluyendo pH y viscosidad, así como mediante ensayos microbiológicos para evaluar su perfil antimicrobiano. La eficacia de descontaminación se evaluó empleando simulantes representativos de distintas amenazas, en este caso se centró en simulantes físicos y nucleares: talco como modelo de contaminante particulado y cloruro de cesio como simulante de agente nuclear. Los ensayos de arrastre se llevaron a cabo sobre una membrana semipermeable, en la que se aplicó una cantidad definida de cada simulante. Posteriormente, se realizó el proceso de lavado utilizando las formulaciones desarrolladas, comparando su eficacia frente a un control negativo consistente en agua sin detergente. La cuantificación del agente remanente tras el proceso de descontaminación se realizó mediante análisis por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Los resultados obtenidos muestran que ambas formulaciones presentan una elevada capacidad de eliminación de contaminantes simulados, con una eficacia superior de forma significativa al control acuoso. Asimismo, se observó un perfil antimicrobiano adecuado, dando estabilidad a las formulaciones, lo que refuerza su potencial aplicabilidad en escenarios reales. En conjunto, estos hallazgos aportan evidencia sólida sobre la eficacia y seguridad de las formulaciones desarrolladas, así como información relevante para su futura implementación en protocolos de descontaminación de personal en entornos militares y civiles.

Palabras clave: Detergente, Simulante, Talco, Cloruro de cesio.

196 – Desarrollo galénico de formulaciones semisólidas frente a agentes químicos

Autores: Leal de la Encina, Javier[1]; Guarnizo Herrero, Víctor[2]; Martínez Alonso, Borja[3]; Pardo Laurel, Hugo[1]; Torres Pabón, Norma Sofía[2]; Peña Fernández, Antonio[2]

Resumen. Las amenazas químicas representan uno de los principales riesgos en entornos NRBQ debido a la elevada toxicidad y diversidad estructural de los agentes implicados, incluyendo vesicantes y compuestos organofosforados con alta capacidad de penetración y persistencia. En este contexto, el desarrollo de sistemas eficaces de descontaminación cutánea resulta crítico para minimizar la absorción sistémica y reducir el daño fisiológico. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la eficacia de formulaciones semisólidas tipo detergente previamente desarrolladas (A y B) frente a simulantes representativos de agentes químicos de guerra. Las formulaciones A y B, diseñadas mediante un enfoque racional y compuestas por diferentes sistemas tensioactivos y excipientes en concentraciones variables, fueron optimizadas con anterioridad en términos de propiedades fisicoquímicas (pH, viscosidad) y compatibilidad biológica. En este estudio, su capacidad de descontaminación se evaluó

[1] Estudiante de doctorado.
[2] Profesor universitario.
[3] Estudiante posdoctoral.

frente a tres compuestos orgánicos seleccionados como simulantes: salicilato de metilo, N,N-dietil-meta-toluamida (DEET) y paraoxón. Estos compuestos fueron elegidos por su similitud estructural y funcional con agentes químicos reales: el salicilato de metilo se emplea comúnmente como simulante de agentes vesicantes como la mostaza sulfúrica, mientras que el paraoxón representa análogos estructurales de agentes organofosforados neurotóxicos como sarín o VX. Por su parte, el DEET presenta características fisicoquímicas intermedias que permiten modelizar el comportamiento de compuestos orgánicos lipofílicos con capacidad de penetración cutánea. La evaluación experimental se llevó a cabo utilizando un modelo de membrana semipermeable, sobre la que se aplicó una cantidad controlada de cada simulante. Posteriormente, se realizó el proceso de lavado con las formulaciones A y B, empleando como control agua sin detergente. La eficacia de descontaminación se determinó mediante la cuantificación del agente residual tras el lavado utilizando cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Los resultados obtenidos evidencian que ambas formulaciones presentan una elevada capacidad de arrastre frente a los tres simulantes evaluados, mostrando una eficacia de forma significativo superior al control acuoso. Asimismo, se observan diferencias en el comportamiento en función de la naturaleza química del contaminante, lo que aporta información relevante para la optimización de formulaciones específicas. En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial de estas formulaciones como herramientas eficaces en protocolos de descontaminación química en escenarios militares y de respuesta a emergencias.

Palabras clave: Detergente, Simulante, Salicilato de metilo, DEET, Paraoxón.

238 – Protección frente a aerosoles o humo mediante agregación dinámica

Autores: Pérez del Álamo, Francisco Javier[1]; Peiró, Sonia[1]; Álamo Toraño, Cristina del[2]; Vázquez Calvo, Ángela[3]; Moraga Quintanilla, Ana Isabel[3]; Alcamí, Antonio[3]; Pérez Díaz, José Luis[2]

Resumen. La dispersión y propagación de agentes radiológicos, biológicos o químicos aerosolizados es un factor clave para la letalidad y alcance de los daños que estos pueden causar. La protección de edificios, espacios, vehículos o naves frente a la penetración de estos aerosoles, o, incluso, la simple compartimentación que impida su propagación en el interior de un edificio o de una nave es una necesidad clara. El uso clásico de sistemas de filtración en vehículos y edificios solo puede resultar efectivo si el vehículo o el edificio está perfectamente cerrado y se impide cualquier entrada de aire que no sea a través de los filtros. Esto entra en conflicto con la necesidad de abrir puertas para permitir el paso o la evacuación de personas y materiales. La protección mediante agregación dinámica de aerosoles permite mantener abierta una puerta en un vehículo o un edificio de forma que las personas puedan pasar o evacuar a su través y, al tiempo, impedir el paso de los aerosoles con una gran

[1] Counterfog S. L.
[2] Universidad de Alcalá.
[3] Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CBMSO), CSIC.

eficiencia mediante la conformación de una serie de chorros de niebla de gotas nanométricas. Estas van capturando las partículas del aerosol y van creciendo hasta colapsar. Permite también plantear la protección de áreas extensas y su aplicación para control de humos en caso de incendios. Su aplicación permitiría, por ejemplo, la contención efectiva de un incendio en un buque, evitando que el humo progrese por un pasillo y eliminando ese humo, sin necesidad de compartimentalizar —permitiendo el paso y evacuación del personal— o sin necesidad de abrir exutorios y, al tiempo, evitando la propagación del humo y del incendio. En el presente trabajo se muestran modelos computacionales desarrollados y resultados de verificación experimental realizados como parte del proyecto Horizon Europe STBernard que confirman la validez de los modelos y su aplicabilidad para poder diseñar sistemas de contención del humo y los aerosoles.

Palabras clave: NBQ, Aerosoles, Humo, Incendio, Niebla.

254 – De hidrocarburos aromáticos a mezclas complejas: sellado de suelos contaminados mediante bioingeniería y bioadsorbentes

Autores: Serrano-Martinez, Damian[1]; Garcia-Fernandez, José Luis[2]; Fernández-Loópez, Carmen[3]; Posada-Baquero, Rosa[2]; Ortega-Calvo, José Julio[2]

Resumen. En este trabajo, continuamos explorando la innovadora estrategia de biorremediación basada en el uso de *Bacillus subtilis* junto con bioadsorbentes para reducir la movilidad de contaminantes orgánicos en suelos, tratada en las ediciones anteriores de 2024 y 2025. Este estudio presenta novedades y tiene una especial relevancia para aplicaciones en entornos militares, donde los suelos frecuentemente se ven afectados por hidrocarburos persistentes derivados de combustibles, explosivos y otras actividades logísticas. Nuestra propuesta se orienta a sistemas de descontaminación sostenibles que puedan ser desplegados en entornos complejos como bases militares o zonas de entrenamiento. A través de experimentos controlados en tubos de ensayo y biorreactores, demostramos que tanto el biochar como *B. subtilis* reducen significativamente la difusión de hidrocarburos ya no solo naftaleno, sino que también fenantreno y tolueno. En

[1] Universidad Politécnica de Cartagena.
[2] Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC).
[3] University Centre of Defence at the Spanish Air Force Academy.

particular, la acción del *biofilm* bacteriano junto con bioadsorbentes logró disminuir en un 80 % la movilidad del contaminante en medios acuosos. Aún más interesante desde el punto de vista operativo fue observar que al aplicar *B. subtilis* sobre membranas con poros de 3 µm, logramos obstruir la difusión del compuesto hacia zonas adyacentes. Este enfoque tiene un enorme potencial en contextos militares donde la prioridad es evitar la migración de contaminantes hacia acuíferos o zonas sensibles. La capacidad de crear barreras microbianas activas que sellen físicamente los poros del suelo añade una capa de protección sin recurrir a técnicas de excavación o contención más agresivas. Tras los resultados expuestos en la edición anterior con el naftaleno, ahora también ha sido comprobado que con fenantreno y tolueno, se reduce muy significativamente la difusión, con lo que ya nos abre la puerta a iniciar experimentación con mezclas complejas de hidrocarburos como son la gasolina o el JP-8, muy comunes en actividades militares. Proponemos que esta tecnología puede ser integrada en protocolos de recuperación posoperativa de terrenos militares, como parte de una estrategia más amplia de gestión ambiental. El empleo de bacterias y bioadsorbentes como el biochar representa una solución de bajo coste, ecológica y adaptable para reducir el riesgo químico en suelos contaminados.

Palabras clave: Biodisponibilidad, Biorremediación, Bioadsorbentes, Hidrocarburos, Recuperación de suelos.

Área II
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, COMUNICACIONES Y SIMULACIÓN

11.1
Sistemas de información para C4I

104 – Integración de vídeo táctico STANAG 4609 para la mejora de la conciencia situacional

Autor: Hernández, Ignacio[1]

Resumen. La gestión eficiente de emergencias y crisis complejas constituye un reto estratégico tanto en el ámbito de la seguridad civil como en el de la defensa. Este trabajo presenta los avances realizados sobre el producto OPR (*OnCall Planning and Response*), una solución de gestión de emergencias orientada a la mejora de la conciencia situacional y al apoyo a la toma de decisiones en escenarios dinámicos. En concreto, se describe la integración de flujos de vídeo procedentes de plataformas aéreas no tripuladas (UAS), transmitidos conforme al estándar STANAG 4609, con capacidades de ortorrectificación en tiempo real directamente en el cliente web de OPR. Esta funcionalidad permite la superposición precisa del vídeo sobre cartografía georreferenciada, facilitando la identificación exacta de perímetros de incendios, inundaciones u otros eventos críticos. Los resultados obtenidos demuestran una mejora significativa en la rapidez y precisión del análisis de la escena, optimizando la coordinación y el despliegue de los medios de emergencia sobre el terreno.

Palabras clave: Vídeo táctico, STANAG 4609, OPR, UAV, UAS.

---

[1] Octave.

158 – Nube táctica de combate para inteligencia geoespacial: IA embarcada en entornos desplegados sin conectividad para análisis multidominio de imágenes satelitales

Autores: Naranjo Martínez, Manuel[1]; Ciruelo Sanz, Luis[1]; Chaparro Parra, Víctor[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) identifica la nube táctica de combate y el *hardware* embarcado para procesamiento intensivo con inteligencia artificial como objetivos tecnológicos prioritarios, orientados a dotar a las unidades desplegadas de capacidad autónoma de procesamiento en entornos con conectividad limitada o denegada. El módulo AMIGO (*Advanced Module for AI Edge Computing*), desarrollado en el marco del proyecto SEDA (Satellite Data AI) financiado por la SDGPLATIN del Ministerio de Defensa a través del programa COINCIDENTE, implementa una nube táctica de análisis geoespacial mediante inferencia distribuida de modelos de *deep learning* en *hardware* embarcado. AMIGO ejecuta los modelos de la plataforma SEDA –detección y clasificación de buques, análisis de actividad portuaria, monitorización de aeródromos, detección de cambios

[1] HI-Iberia Ingeniería y Proyectos.

en infraestructuras– directamente en dispositivos desplegables con GPU embarcadas, sin dependencia de comunicaciones con retaguardia. La plataforma SEDA está operativa desde 2020 en el Centro de Operaciones de Vigilancia Acción Marítima (COVAM), y desde 2022 en el Centro de Inteligencia de las Fuerzas Armadas (CIFAS), el Centro Geográfico del Ejército de Tierra (CEGET) y el Centro de Sistemas Aeroespaciales de Observación (CESAEROB). La arquitectura se basa en contenerización con servicio de modelos de IA optimizado para configuraciones SWaP (*Size, Weight and Power*) reducidas, con un *frontend web* ligero que permite al analista de inteligencia táctico operar el sistema de forma autónoma. Los modelos sirven capacidades multidominio –marítimo, terrestre y aéreo– desde un único nodo de *edge computing*, alineándose con el paradigma de integración multidominio de la ETID. La interoperabilidad OTAN se garantiza mediante la generación automática de informes en formatos estándar KML y NVG, compatibles con protocolos BICES. El sistema ha participado en el ejercicio OTAN ACE 25 y tiene prevista su participación en el ejercicio CWIX 26, como experimentación técnico-operativa para validar su integración en arquitecturas C4ISR aliadas, proyectando la capacidad de *edge* GEOINT de las FAS españolas hacia la Alianza. Los resultados preliminares muestran una degradación de rendimiento en el nodo *edge* inferior al 5 % en tiempo de ejecución respecto a la versión en infraestructuras de computación centralizadas convencionales, dentro del objetivo de diseño del proyecto. El *benchmark* formal convencional vs. *edge* –con conjunto de test fijo y medición de latencia por imagen– se completará con los resultados de los ejercicios OTAN ACE 25 y CWIX 26, consolidando la Línea 2.6.2 de la ETID 2026 como capacidad operativa real de las FAS.

Palabras clave: *Edge computing*, Inteligencia artificial embarcada, Análisis geoespacial, Nube táctica de combate.

202 – Fusión multisensor heterogénea e inteligencia artificial explicable para la detección y seguimiento predictivo de embarcaciones de alta velocidad en USV interceptadores

Autores: Moreu Gamazo, José M.[1]; Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]; Escola, Pol[1]; García Crespo, Ricardo[1]; Liaño Diaz, Manuel[1]

Resumen. El uso creciente de embarcaciones de alta velocidad en actividades ilícitas plantea un reto operacional crítico para las fuerzas de seguridad marítimas, con impacto directo en la protección de infraestructuras críticas y en la vigilancia marítima en redes C4ISR bajo comunicaciones degradadas o escenarios GNSS-denegados. El proyecto USVINT (Lote 3, CPP 02/2025) desarrolla un sistema de interceptación no letal basado en vehículos de superficie no tripulados (USV) capaz de detectar, seguir e interceptar de forma autónoma embarcaciones de hasta 75 nudos en entornos litorales y de alta mar. El presente trabajo describe el diseño de los módulos de percepción y comprensión del entorno (PCE) y seguimiento y predicción de trayectorias (SPT) del sistema de IA embarcada SIAD-Mar.

[1] HI-Iberia Ingeniería y Proyectos S. L.

El módulo PCE aborda la detección y clasificación de embarcaciones en tiempo real mediante fusión multisensor heterogénea de cámaras electroópticas (EO), térmicas (IR), LIDAR y mensajes AIS, con el propósito de reducir la carga cognitiva del operador. La arquitectura aplica fusión a nivel de características entre los canales EO/IR y fusión a nivel de objeto con las nubes LIDAR mediante proyección *Bird's Eye View* (BEV), generando una representación unificada con posición georreferenciada, clase e índice de riesgo por contacto. El módulo SPT transforma estas detecciones en *tracks* persistentes mediante estimadores bayesianos adaptativos con múltiples hipótesis de maniobra simultáneas, fusionando las salidas del PCE con retornos de radar y trazas AIS. Modelos de aprendizaje profundo anticipan trayectorias a horizontes de hasta treinta segundos, capacidad esencial para reaccionar frente a cambios bruscos de rumbo y velocidad. El *pipeline* completo se ejecuta sobre *hardware* embarcado de altas prestaciones respetando los requisitos de latencia extremo a extremo, e integra con el sistema de mando y control mediante ROS2/DDS. Una capa de IA explicable (XAI) justifica al operador cada alerta en cumplimiento del paradigma *human-on-the-loop* exigido en aplicaciones de seguridad y defensa. El trabajo responde a las prioridades de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026): contribuye a los USV de la AIT 6.4.2 mediante fusión multisensor e IA explicable para la ayuda a la decisión en tiempo real, al análisis automático de datos de sensores de la AIT 2.6, y al objetivo transversal de aplicación de la IA a defensa atendiendo a los riesgos de opacidad, falta de robustez y fallos en cascada (línea 11.5.1).

Palabras clave: Vehículos de superficie no tripulados (USV), Fusión multisensor, Inteligencia artificial explicable (XAI).

230 – ARGO: asistencia al operador en campo mediante IA embarcada autónoma para operaciones de inteligencia sin infraestructura de red

Autores: Zaera Mata, Sergio[1]; Abenza Severa, Eduardo[1]; Alonso Garrido, César[1]; Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gallardo Romero, Galo[1]; Castro Cernadas, Jaime[1]; Queraltó Pereira, Sergio[1]; Redondo Soto, Tamara[1]; García Higueras, Luis[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) pone de manifiesto la necesidad de dotar al operador en el punto de acción de capacidades de procesamiento inteligente autónomo: sistemas que funcionen sin depender de conectividad de red, que procesen la información en el momento y lugar de la captura y que reduzcan la carga cognitiva del operador en condiciones operativas adversas. La disponibilidad de esta capacidad directamente en campo —sin latencia de enlace, sin dependencia de infraestructura externa— representa un salto cualitativo en la eficacia de las operaciones de recogida de inteligencia en teatro. Presentamos ARGO, un sistema de asistencia al operador en campo basado en inteligencia artificial embarcada que opera con plena autonomía sin conexión con el puesto de mando. El núcleo de ARGO es su motor de

[1] HI Iberia.

IA local: modelos de reconocimiento y clasificación ejecutados de forma íntegra en el dispositivo de campo, que asisten al operador en tiempo real identificando, categorizando y priorizando el material recogido en el momento mismo de la captura. La IA guía activamente al operador —sugiriendo acciones, alertando de elementos de interés, adaptando el flujo de trabajo al contexto de la operación– sin requerir ningún enlace externo. Cada elemento capturado queda sellado criptográficamente en el instante de la captura, garantizando la integridad de la cadena de evidencia desde el origen, con infraestructura de clave pública embarcada que opera de igual forma sin conectividad. Cuando se restaura el enlace, ARGO sincroniza automáticamente con el sistema central mediante un protocolo tácticamente consciente que prioriza la información más crítica. ARGO se fundamenta en la experiencia del proyecto FORENSIA-HORUS, sistema de captura forense asistida por IA validado operativamente con la Policía Nacional científica española, donde la arquitectura ha demostrado su capacidad de operar de forma autónoma manteniendo la integridad de los datos en condiciones de campo reales. ARGO traslada esa base al entorno de defensa, con las adaptaciones necesarias para las exigencias de teatro militar: desde equipos de operaciones especiales hasta plataformas no tripuladas y sensores remotos. Inteligencia en el punto de acción, sin depender de nadie más.

Palabras clave: IA embarcada, Asistencia al operador, *Edge computing*, Autonomía operativa, Entornos degradados, Explotación en campo.

231 – OLYMPUS: sistema de inteligencia de ciclo completo – integración de captura autónoma en campo y análisis central con IA para operaciones de Defensa

Autores: Zaera Mata, Sergio [1]; Abenza Severa, Eduardo[1]; Alonso Garrido, César[1]; Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gallardo Romero, Galo[1]; Castro Cernadas, Jaime[1]; Queraltó Pereira, Sergio[1]; Redondo Soto, Tamara[1]; García Higueras, Luis[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) identifica dos necesidades complementarias e interdependientes en el ámbito de la inteligencia operativa: la capacidad de procesar información con IA directamente en el punto de captura, sin conectividad de red y la capacidad de integrar y analizar de forma automática datos heterogéneos en el puesto de mando central, reduciendo la carga del analista y acelerando la generación de conocimiento accionable. Ambas necesidades forman parte de un mismo ciclo operativo que, para ser eficaz, debe funcionar de extremo a extremo con coherencia de datos y cadena de evidencia ininterrumpida. El reto no es resolver cada capacidad por separado —sino integrarlas en un sistema que funcione como un todo, incluso cuando el enlace entre campo y centro no existe—. Presentamos

[1] HI Iberia.

OLYMPUS, un sistema de inteligencia de ciclo completo que integra dos capacidades desarrolladas y validadas en el proyecto FORENSIA: la captura autónoma en campo con IA embarcada (FORENSIA-HORUS), que opera sin conectividad y sella la cadena de evidencia desde el instante de captura y el análisis centralizado con IA responsable (FORENSIA-THOT), que integra fuentes heterogéneas, correlaciona entidades, detecta patrones y distribuye hipótesis verificables al equipo analítico. Cuando el operador en campo recupera el enlace, OLYMPUS sincroniza de forma automática ambos extremos mediante un protocolo tácticamente consciente, asegurando que el analista en el puesto de mando disponga de toda la información capturada en teatro con su cadena de evidencia íntegra y lista para su explotación. El proyecto FORENSIA está siendo desarrollado y validado en el dominio de la seguridad interior española –un entorno con restricciones operativas, legales y tecnológicas de elevada analogía con el dominio militar. OLYMPUS representa la propuesta de transferencia de ese desarrollo al ámbito de defensa: un sistema ya construido, ya probado, que cubre el ciclo completo desde el operador desplegado hasta el analista en el puesto de mando. La propuesta presenta potencial como capacidad nacional con base tecnológica demostrada y camino claro hacia la operatividad en el dominio de defensa.

Palabras clave: Modelos de lenguaje (LLM), Inteligencia de ciclo completo, *Edge Computing*, IA responsable, Fusión multimodal.

255 – Cómputo orbital distribuido para C4ISR autónomo

Autores: Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gallardo Romero, Galo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[2]

Resumen. La próxima generación de infraestructura espacial converge hacia constelaciones de cómputo distribuido para C4ISR autónomo: nodos LEO/GEO con fusión sensor-decisor a bordo, IA táctica sin *downlink* completo, computación cuántica federada y centros de datos orbitales (ODC). Iniciativas como SDA Tranche 1/2 (USSF), DARPA Blackjack, ESA HydRON, IRIS² y ODC comerciales (Starcloud, Lonestar, NTT) materializan este paradigma. Su requisito de sistema crítico es un *mesh* óptico intersatélite y *feeder links* tierra-órbita con disponibilidad sostenida —no picos esporádicos— a tasas Tbps. El cuello de botella es la turbulencia atmosférica, que impide enlaces ópticos sostenidos a baja elevación. En el caso crítico (10°, r_0 = 0,05 m), la frecuencia de Greenwood supera 1000 Hz; el bucle de óptica adaptativa (AO) requiere operar a 5 kHz con retardo de dos *frames*. El controlador integrador clásico introduce un error temporal cuantificado por el coeficiente de propagación de ruido (NPC), que limita la disponibilidad del *feeder* a ventanas reducidas incompatibles con sesiones de cómputo orbital sostenido. Este trabajo

[1] HI Iberia.
[2] HI Iberia – Inteligencia artificial. Disponible en: https://www.hi-iberia.es/artificial-intelligence.

presenta la primera formalización cuantitativa documentada del límite NPC para el enlace LEO-tierra de referencia (D/r□ = 16, d = 2), enmarcada en las líneas ETID 8.2 (SATCOM) y 11.2.6. La derivación analítica a partir de la función de transferencia de Hardy establece NPC_int(g = 0,3, d = 2) = 0,686 como línea base; un predictor de polo único alcanza NPC_pred = 0,0652, mejora teórica de 10,5×. Sistemas operativos reales (Subaru/SCExAO, Keck, VLT/SPHERE) documentan mejoras prácticas de 2× a 5×. Se analizan tres estrategias de control –LQG/EOF lineal, SL+RL y arquitectura híbrida SL+RL+PINN con restricciones físicas de Kolmogorov/Taylor– estableciendo el techo de mejora alcanzable por cada una. En términos de sistema, esta mejora se traduce en sesiones de pase ampliadas, latencia determinista y mayor margen energético disponible para compute a bordo. Habilita capacidades C4ISR de defensa: federación de inferencia táctica entre nodos LEO/GEO sin *downlink* completo (Tactical Edge Cloud OTAN, CJADC2), QKD satelital integrada en *mesh* (Eagle-1, EuroQCI) y *Space Domain Awareness* con fusión sensor-decisor a bordo. NASA LCRD/DSOC e IRIS² ilustran la madurez del dominio. La validación experimental –campañas on-sky en la OGS de Tenerife (ESA/IAC) en la propuesta ASPIRE (ESA ARTES 4.0, SL SPL 6C.073)– es trabajo futuro. Limitaciones: contribución cuantitativa teórica o de terceros; la aproximación de Hardy omite centelleo y no linealidad del sensor piramidal.

Palabras clave: Cómputo orbital distribuido, C4ISR autónomo en órbita, *Mesh* óptico intersatélite, Control predictivo de óptica adaptativa, Coeficiente de propagación de ruido (NPC), ASPIRE – ESA ARTES 4.0, QKD satelital (Eagle-1 EuroQCI), ETID 8.2 SATCOM.

13 – *Crossbond* - Conectividad, interoperabilidad y C2 entre plataformas aéreas

Autores: Jiménez, Juan Manuel[1]; Núñez Jiménez, Manuel[1]; Escribano Febrel, María[1]

Resumen. El Futuro Sistema de Combate Aéreo (FCAS) requerirá de una combinación de capacidades de recopilación de información, análisis de la misma y toma de decisiones, junto a conjuntos de capacidades efectoras. Para ello, hará uso de las tecnologías punteras de conectividad, interoperabilidad, comando y control (C2) dentro del combate aéreo, todo ello con el objetivo de la obtención y gestión de información, acelerando la toma de decisiones y, por lo tanto, ganar en la ejecución y éxito de las misiones aéreas o conjuntas. «CrossBond» de ADS es una iniciativa tecnológica focalizada en asegurar la conectividad y la interoperabilidad entre las distintas capas existentes dentro de una operación o misión aérea, y de todas las aeronaves involucradas en ella (actualmente solo Airbus). Esta iniciativa es agnóstica desde el punto de vista del tipo plataforma aérea (L1 y L2), por lo que se puede extender e incorporar a vehículos no Airbus, que pudieran estar participando dentro de una misma misión, ya sean de ala fija, ala rotatoria y tanto tripuladas como no. «CrossBond»,

[1] Airbus Defence, Space España.

por tanto, desarrolla un concepto y tecnologías clave que suponen los pilares que facilitan la implementación de la nube de combate en las aeronaves y su integración en el sistema de sistemas. El objetivo final es testar en vuelo dichas soluciones. En consecuencia, se persigue maximizar el uso táctico de las plataformas involucradas en una misión, mediante el intercambio en tiempo real de la información, consiguiendo de esta forma extender los rangos de conectividad en operaciones aéreas o conjuntas, así como acelerar el proceso de toma de decisiones y mejorar el flujo de información de mando y control (C2). Como oportunidad de crecimiento, *CrossBond* podría extenderse a dominios marítimos y terrestres, así como a misiones de ámbito dual o incluso civil. SIAGEN (Sistema Integral Aéreo de última Generación) es el acelerador dentro de FCAS que permite que *CrossBond* capitalice las tecnologías maduradas de conectividad e interoperabilidad por parte de ADS. De esta manera, se facilita preparar a España y a su industria para un potencial despliegue en el corto plazo.

Palabras clave: FCAS, *CrossBond*, SIAGEN, Conectividad, Interoperabilidad, C2, Nube de combate, Dual.

11.2
Comunicaciones tácticas

51 – Desarrollo de un sistema de mensajería táctica resiliente sobre redes malladas LoRa-Meshtastic para entornos navales de instrucción

Autores: Torres Seara, Alberto[1]; Nocelo López, Rubén[2]

Resumen. La eficacia del mando y control (C2) en el ámbito naval militar depende críticamente de la disponibilidad de sistemas de comunicación fiables. En escenarios operativos modernos, caracterizados por la posible degradación o negación del dominio electromagnético (entornos DDIL), la dependencia de infraestructuras satelitales o redes IP introduce vulnerabilidades severas. Este desafío es especialmente visible en escalones tácticos básicos, como las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar, donde el uso de comunicaciones en abierto por VHF no instruye a los alumnos en la disciplina del secreto ni en el manejo de herramientas digitales de mando. Para dar respuesta a esta brecha operativa, el presente trabajo describe el diseño, desarrollo y validación de una solución de mensajería táctica autónoma basada en *hardware* comercial de bajo coste (COTS). El sistema físico se apoya en transceptores LilyGO T-Beam bajo la modulación LoRa y el protocolo de red mallada (MANET) Meshtastic.

[1] Armada española, Ministerio de Defensa.
[2] Centro Universitario de la Defensa – Escuela Naval Militar.

Esta arquitectura permite establecer una burbuja de conectividad de área local sin dependencia de ninguna infraestructura externa, donde cada nodo actúa simultáneamente como terminal y repetidor, garantizando la cobertura mediante técnicas de inundación gestionada (*managed flood*). Dado que las aplicaciones nativas de estos protocolos operan bajo una lógica de chat convencional, insuficiente para las necesidades de estructuración y doctrina militar, la principal aportación de este trabajo radica en el desarrollo de una aplicación de escritorio en Python. Esta herramienta actúa como una capa superior de servicio que permite la emulación del Sistema Automático de Conmutación de Mensajes de la Armada (Sacomar). La aplicación transforma la transmisión de datos crudos en un sistema de mensajería estructurada inspirado en la normativa naval (como la ACP-121) implementando plantillas para órdenes formales, gestión jerárquica de carpetas y control de identidades operativas. Asimismo, para mitigar las restricciones de ancho de banda inherentes a LoRa, la aplicación incorpora un algoritmo de segmentación y reensamblado de paquetes en la capa de transporte, asegurando la integridad de mensajes extensos. Las pruebas de validación en la mar en ejercicios tácticos reales confirman la viabilidad del sistema para sostener la conciencia situacional mediante el intercambio en tiempo real de posiciones GPS, telemetría y órdenes cifradas mediante AES-256 de extremo a extremo. En conclusión, el sistema propuesto demuestra cómo la hibridación de tecnologías LPWAN (*Long Power Wide Area Networks*) abiertas y el desarrollo de *software ad-hoc* permiten salvar el vacío existente en las comunicaciones de pequeñas plataformas navales, proporcionando un entorno de adiestramiento realista, seguro y de alta resiliencia.

Palabras clave: Mensajería táctica estructurada, Redes malladas LoRa-Meshtastic, Resiliencia en entornos DDIL.

53 – Diseño e implementación de un sistema de comunicaciones aire-aire robusto frente a interferencias intencionadas

Autores: Evanguelopulos, Manuel[1]; Loinaz, Mikel[1]; Ferrero, Javier[1]

Resumen. En los últimos años, la interferencia intencionada se ha convertido en una amenaza relevante para las plataformas aéreas no tripuladas que operan en entornos radioeléctricos disputados. Los conflictos recientes, incluida la guerra de Ucrania, han puesto de manifiesto el impacto operativo de la guerra electrónica, en la que el empleo de técnicas de *jamming* permite degradar las comunicaciones y denegar el acceso a señales de navegación por satélite, comprometiendo no solo la navegación, sino también la coordinación y la efectividad de la misión. Este trabajo presenta el diseño y la implementación de un sistema de comunicaciones aire-aire para aplicaciones con vehículos aéreos no tripulados (UAV), concebido para ofrecer una mayor resiliencia frente a interferencias de *jamming*. La propuesta está orientada a escenarios en los que la continuidad del enlace resulta prioritaria frente a la tasa de transmisión, es decir, aquellos en los que se quiere mantener la disponibilidad de las comunicaciones incluso ante condiciones de baja relación señal a interferencia. Para ello, se ha adoptado una capa física de baja tasa y alta robustez gracias a estrategias

[1] GMV Aerospace and Defence.

de sincronización robusta, corrección de errores y espectro ensanchado. La solución se ha desarrollado en Python empleando radios definidas por *software* (SDR), lo que permite validar de forma flexible el funcionamiento de la arquitectura propuesta y facilita una futura migración a plataformas embebidas. Sobre esta base, el transmisor y el receptor emulan dos nodos de comunicaciones embarcados sobre UAV que intercambian datos de telemetría GNSS e inerciales. Este intercambio de información soporta operaciones cooperativas entre ambos vehículos, y proporciona apoyo a la navegación mediante algoritmos de corrección de localización cuando las referencias externas se encuentran degradadas o denegadas.

Palabras clave: Vehículos aéreos no tripulados (UAV), Comunicaciones aire-aire, Interferencias intencionadas, *Jamming*, Radios definidas por *software* (SDR), Espectro ensanchado.

193 – Optimización del despliegue inicial de redes tácticas de telecomunicaciones multitecnología

Autores: Muñoz Fernández, Mario[1]; Skorin-Kapov, Nina[2]

Resumen. Las redes tácticas de telecomunicaciones constituyen infraestructura crítica para el establecimiento rápido de comunicaciones en operaciones militares, respuesta a desastres y despliegues expedicionarios. La revisión sistemática de la literatura previa identificó una brecha central de falta de un marco unificado de optimización para el despliegue inicial que considere de forma integrada el conjunto heterogéneo de tecnologías habitualmente requeridas en operaciones tácticas (radio HF, sistemas VHF/UHF, comunicaciones por satélite (SATCOM) y radioenlaces IP) bajo restricciones operacionales realistas. Este trabajo aborda dicha brecha mediante la propuesta de un modelo preliminar de optimización integrado para el despliegue inicial de redes tácticas multitecnología. Las restricciones principales del modelo son el inventario de equipos disponibles y los requisitos de cobertura del área de operaciones. El objetivo es garantizar servicio a la totalidad del área de operaciones minimizando los recursos empleados, con posibilidad de introducir redundancia

[1] Ejército de Tierra.
[2] Universidad Politécnica de Cartagena.

controlada para aumentar la resiliencia ante fallos. El modelo integra los distintos niveles tecnológicos que componen la arquitectura de comunicaciones táctica doctrinal. Los radioenlaces IP constituyen el elemento vertebrador de la red, proporcionando el *backhaul* de alta capacidad que interconecta los nodos principales en línea de visión. Sobre esta columna vertebral, las radios VHF/UHF extienden la cobertura táctica local y permiten la coordinación móvil de las unidades desplegadas. La radio HF cubre las zonas donde el terreno bloquea la línea de visión y no es posible establecer enlaces terrestres, garantizando conectividad más allá del horizonte radio. Finalmente, SATCOM proporciona el enlace con el resto del mundo y actúa como medio de emergencia cuando los demás sistemas no pueden garantizar conectividad. La principal contribución de este trabajo es la integración de forma conjunta la selección de tecnología, el emplazamiento de nodos y la asignación de recursos para el despliegue inicial de redes tácticas heterogéneas. El modelo propuesto sienta las bases para poder llevar a cabo un caso de estudio de datos reales para su validación.

Palabras clave: Optimización del despliegue inicial, Redes tácticas multitecnología, Planificación de comunicaciones militares, Cobertura operacional, HF/VHF/UHF/SATCOM.

11.3
Simulación

6 – Modelos de combate; la evolución necesaria

Autor: Minguela Castro, Gerardo[1]

Resumen. El teatro de operaciones se caracteriza por entornos cada vez más complejos, sofisticados, asimétricos y exigentes, con nuevas amenazas, donde el extraordinario desarrollo tecnológico que estamos experimentando establece nuevas formas, de resolución y modelización de la batalla. Los modelos tradicionales que están detrás de la capacidad predictiva o de la toma de decisiones informada, y por el que se obtiene ventaja militar, deben ser complementados con técnicas disruptivas de inteligencia artificial. Tras realizar una revisión de los modelos clásicos que apoyan la toma de decisiones de planas mayores, proponemos nuevos mecanismos que eliminan sus limitaciones en la generación de la «capacidad predictiva» y en el desarrollo de la «toma de decisiones» consecuente, definiendo una nueva aproximación explícita que busca entender, trazar y anticipar los efectos directos e indirectos de las decisiones operacionales. Para llevarlo a término, tendemos puentes entre los fundamentos históricos de la modelización del combate, personificados por los modelos matemáticos de Lanchester, y la intrincada dinámica del combate de la guerra contemporánea, recurriendo a la incorporación de las

[1] ISDEFE.

redes neuronales profundas y aprendizaje automático en la orientación de la operación militar y las decisiones, adaptándolas al entorno situacional y creando una mejora competitiva. Con una utilidad clara en simulaciones constructivas, gemelos digitales y sistemas de apoyo a la decisión operativa, que se enfrentan hoy, a un futuro cambiante y complejo, en el que comprender el entorno operativo y tomar decisiones rápidamente es un requisito esencial. Ejemplos de batallas históricas y contemporáneas demuestran la mejora de la capacidad predictiva, que permiten validar este nuevo marco teórico integrador. En resumen, esta propuesta fortalece la toma de decisiones en entornos operacionales complejos proporcionando una ventaja estratégica en escenarios bélicos desafiantes y sienta las bases para futuras herramientas de apoyo a la decisión estratégica y operacional enmarcadas en la batalla terrestre.

Palabras clave: Modelos de combate, Simulación, Sistema de apoyo a la decisión, Inteligencia artificial.

14 – Controlando lo que no se puede medir: *deep learning surrogate models* y *reinforcement learning* para la regulación autónoma del vacío en el prototipo MuVacAS de IFMIF-DONES

Autores: Rodríguez Llorente, Guillermo[1,2]; Gallardo Romero, Galo[1]; Morant Navascués, Rodrigo[1]; Sabogal, Anderson[3,4]; Torregrosa-Martín, Claudio[3]; Podadera, Iván[3]; Weber, Moisés[3]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La cualificación de materiales resistentes a irradiación extrema es un requisito fundamental para la fusión nuclear. La instalación IFMIF-DONES, en construcción en Granada, genera un flujo neutrónico mediante un acelerador lineal que impulsa deuterones sobre un circuito de litio. El prototipo MuVacAS, plataforma de veintiocho metros que replica la sección final del acelerador, sirve como banco de pruebas para validar las tecnologías de vacío y control asociadas. La presión en la cámara de vacío del blanco debe mantenerse en una ventana extremadamente estrecha (10^{-4}–10^{-5} mbar): desviaciones comprometen la estabilidad del haz y

[1] H Iberia.
[2] UC3M.
[3] Consorcio IFMIF-DONES España.
[4] UGR.

la integridad del blanco. El problema se agrava por la imposibilidad de instalar sensores en la cámara debido al entorno de irradiación previsto, y por la dinámica no lineal del sistema, que limita la eficacia de controladores PID convencionales. Este trabajo presenta un enfoque basado en datos para la estimación indirecta de presión y la regulación autónoma de la inyección de argón, en el marco del proyecto DONES-FLUX. La solución combina dos Fourier Neural Operators (FNO) con un agente de *Reinforcement Learning* basado en PPO. El primer FNO actúa como sensor virtual, infiriendo la presión a partir de manómetros aguas arriba con un error medio del 4,59 %. El segundo modela la evolución del campo de presión y proporciona un gemelo digital estable que permite entrenar al agente sin interacción con el *hardware*. El agente fue desplegado sin reajuste en el prototipo real mediante EPICS, bajo una configuración diferente a la del entrenamiento que introduce una dinámica no contemplada durante el aprendizaje. A pesar de esta discrepancia, reguló con éxito la presión en todos los escenarios evaluados. La comparativa con controladores PID demostró que los agentes eliminan el *chattering* del actuador y proporcionan un control más suave y estable. La metodología tiene carácter dual y es directamente transferible al ámbito de defensa y seguridad. El paradigma demostrado, control autónomo mediante gemelos digitales y sensores virtuales en entornos donde la instrumentación directa es inviable, es aplicable a la operación de sistemas en zonas hostiles, escenarios NRBQ, propulsión nuclear o gestión de instalaciones críticas donde la intervención humana o la sensorización convencional están restringidas. Este trabajo contribuye a las áreas 3.2 Materiales y 3.3 Energía, al avanzar en tecnologías habilitadoras para la soberanía energética, y a 11.3 Simulación y 11.5 Aplicación a Defensa de Avances en Tecnologías TIC, al validar experimentalmente IA para el control autónomo de infraestructuras críticas.

Palabras clave: Sensores virtuales, Gemelos digitales, Tecnologías de vacío, Fusión nuclear, IFMIF-DONES, Control autónomo, Aprendizaje por refuerzo, Operadores neuronales de Fourier, Algoritmo PPO, Infraestructuras críticas, Defensa y seguridad.

39 – Ingeniería de sistemas para gemelos digitales en la optimización del ciclo de vida de activos y plataformas

Autores: Technology Alliance, Basque Research[1]; Technology Alliance, Basque Research[1]; Lambán Castillo, María Pilar[2]

Resumen. El concepto de gemelo digital (DT – *Digital Twin*) popularizado durante la última década se ha convertido en una de las tecnologías prioritarias recogidas en los principales programas estratégicos de base tecnológica e industrial en el ámbito civil y militar. Estos DT pueden ofrecer diferentes servicios a lo largo del ciclo de vida de los activos y plataformas permitiendo, por ejemplo, reducir los costes de mantenimiento o evaluar los riesgos en el cumplimiento de la misión. En los últimos años, las tecnologías asociadas al DT han experimentado una tremenda evolución en ámbitos como la capacidad de cómputo o las capacidades de la inteligencia artificial. Sin embargo, la aplicación del DT sigue presentando importantes desafíos relacionados con la complejidad en su integración en la operativa real, el elevado coste de desarrollo, o la dificultad para la replicar estas soluciones. Este trabajo presenta un nuevo método basado en la ingeniería de sistemas (SE – *System Engineering*)

[1] BRTA.
[2] Ingeniería de Diseño y Fabricación, EINA, Universidad de Zaragoza.

para la gestión integral del ciclo de vida de un DT y su relación durante la fase de uso con alguna de las ocho funciones primarias de un sistema militar definidas en el modelo de ciclo de vida del Departamento de Defensa de Estados Unidos. Este método se fundamenta en el análisis sistémico del DT y la aplicación de procesos propios de la SE, como los propuestos por INCOSE (International Council on System Engineering) y algunas normas internacionales. Estos procesos engloban todas las actividades creativas, manuales y técnicas necesarias para un sistema de DT que necesita ser definido con suficiente detalle en sus especificaciones. El estudio se fundamenta sobre una hipótesis en la que cualquier DT puede modelarse como un sistema ciberfísico compuesto por diferentes subsistemas y componentes para ser considerado como sistema de interés (SoI) que mantenga relaciones con otros sistemas habilitadores o de interacción. Como conclusión, el trabajo destaca la capacidad del método propuesto para gestionar de manera integral y mediante métodos contrastados el DT; identificar y concretar desde el diseño las diferentes aplicaciones del DT y definir las tecnologías base y métodos de gestión estandarizados que permitan optimizar grandes programas militares que incluyen el desarrollo de sistemas DT. Para concluir, el trabajo identifica algunas líneas de trabajo futuro como la incorporación de aproximaciones basadas en modelos (MBSE – *Model Based System Engineering*) en los procesos de SE de un DT.

Palabras clave: Gemelo digital, Ingeniería de sistemas, Metodología, Gestión del ciclo de vida.

103 – Instrucción militar básica en concepto de Seguridad Interior mediante simulación virtual interactiva

Autores: CUD-ENM[1]; CUD-ENM[1]; CUD-ENM[1]

Resumen. La evolución de las tecnologías digitales de última generación ha impulsado la integración del ámbito virtual en las Fuerzas Armadas, lo que ha favorecido el desarrollo de nuevas herramientas de adiestramiento. En este contexto, la simulación se ha consolidado como un elemento clave para mejorar la eficacia, la preparación y la seguridad de las dotaciones de los buques, especialmente en entornos complejos y de alto riesgo, donde la repetición de ejercicios reales presenta limitaciones operativas, económicas y de seguridad. El presente trabajo aborda el desarrollo de un simulador virtual interactivo orientado a la instrucción en Seguridad Interior a bordo de buques de la Armada, concebido como una plataforma integral de entrenamiento y evaluación del personal. El proyecto se basa en la creación de un entorno tridimensional de alta fidelidad capaz de recrear de forma realista escenarios operativos y situaciones de emergencia, permitiendo la interacción del usuario con los distintos elementos del sistema. Mediante el empleo de técnicas avanzadas de diseño y modelado, junto con el uso del motor gráfico Unreal

[1] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

Engine, se ha desarrollado un escenario interactivo que posibilita la ejecución de procedimientos operativos y el entrenamiento en la toma de decisiones en situaciones críticas. La programación mediante *Blueprints* permite implementar una lógica dinámica que gestiona tanto el comportamiento del entorno como la respuesta del sistema ante las acciones del usuario, dotando al simulador de un alto grado de realismo e inmersión. Adicionalmente, el simulador incorpora un sistema de evaluación que analiza el desempeño del usuario durante la ejecución de los ejercicios, proporcionando métricas objetivas que facilitan la mejora continua del entrenamiento y el análisis del rendimiento del personal. En conclusión, este trabajo demuestra el potencial de la simulación basada en tecnologías digitales avanzadas como herramienta innovadora para la modernización del adiestramiento en el ámbito de la defensa, ofreciendo una solución segura y eficiente, alineada con las necesidades actuales de preparación operativa de las Fuerzas Armadas.

Palabras clave: Simulación virtual, Seguridad Interior, Gamificación, Adiestramiento militar, *Unreal Engine*.

106 – Análisis de sistemas de última generación para simulación multidominio, aplicado al entrenamiento «War Room» en operaciones aeroespaciales

Autores: Navas Bernal, Sergio[1]; Roca-González, José Luis[2]; López Belchí, Alejandro[3]; Vera López, Juan Antonio[4]

Resumen. La evolución hacia escenarios operativos multidominio ha intensificado la necesidad de herramientas avanzadas para el entrenamiento en la toma de decisiones en entornos donde interactúan de forma crítica las plataformas navales, aéreas y terrestres. En operaciones modernas, la coordinación entre sensores, sistemas de armas y arquitecturas de mando y control (C2) en estos dominios condiciona directamente la eficacia táctica, sobre todo en contextos de negación de área (A2/AD) y elevada incertidumbre. Este trabajo analiza el empleo de entornos de simulación gamificados tipo *War Room*, empleados en las Fuerzas Armadas de

[1] Ejército del Aire y del Espacio, Ministerio de Defensa.
[2] Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire y del Espacio, Dpto. Tecnología y Ciencias Aeroespaciales.
[3] ETS de Ingeniería Naval y Oceánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Dpto. de Física Aplicada y Tecnología Naval.
[4] Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire y del Espacio, Departamento de Ciencias Aplicadas.

Estados Unidos, como soporte para el estudio y adiestramiento en operaciones conjuntas multidominio. Mediante el uso de herramientas de simulación constructiva de grado profesional, se desarrollan escenarios en los que se modela la interacción entre plataformas aéreas (cazas, sensores embarcados, armamento aire-superficie), sistemas navales (estructuras de mando, sensores y defensa integrada) y plataformas terrestres (baterías antiaéreas, nodos de mando y control, sensores desplegados). Estos entornos permiten reproducir con fidelidad la dinámica operativa derivada de la integración de los tres dominios, incluyendo la gestión de la información, la asignación de recursos y la ejecución de misiones complejas. El análisis se centra en variables operativas clave como perfiles de vuelo, detectabilidad radar, empleo de contramedidas electrónicas y selección de armamento, evaluando su impacto sobre la supervivencia de las plataformas aéreas frente a sistemas defensivos integrados terrestres y navales. Los resultados evidencian cómo la correcta explotación de factores como el enmascaramiento orográfico, la gestión de emisiones electromagnéticas y la sincronización de sensores condiciona la eficacia de la operación conjunta, especialmente en escenarios donde las defensas superficie-aire terrestres constituyen el elemento dominante del entorno A2/AD. Desde una perspectiva metodológica, se incorporan técnicas de análisis cuantitativo como simulación Monte Carlo, árboles de decisión y métricas de carga cognitiva, permitiendo evaluar tanto la robustez de los cursos de acción (COA) como el comportamiento del operador en escenarios de alta complejidad. Este enfoque facilita la validación de tácticas y procedimientos en un entorno controlado, reduciendo costes y riesgos frente a ejercicios reales. Se concluye que los entornos *War Room* constituyen una herramienta eficaz para el análisis y entrenamiento en operaciones integradas entre plataformas navales, aéreas y terrestres, al permitir estudiar de forma sistemática la interacción entre sistemas, sensores y decisiones en contextos realistas. Su aplicación en el ámbito de la seguridad y defensa refuerza la preparación operativa frente a escenarios multidominio cada vez más exigentes.

Palabras clave: Simulación multidominio, Operaciones aeroespaciales, «War Room», Gamificación.

108 – Gemelo digital para hélices de alto y bajo número de Reynolds

Autores: Parra Villarejo, Fernando[1]; de Grado, Jesus Gonzalo[1]; Delgado Marcos, Adrian[1]; Domínguez Fernández, Diego[1]

Resumen. La evaluación de las prestaciones de una hélice es una tarea fundamental, en tanto que las mismas afectan de forma directa al consumo necesario durante el vuelo de la aeronave y, por tanto, a dos aspectos clave como son su alcance y su autonomía. En este trabajo, los autores proponemos y evaluamos una metodología cuyo objetivo es obtener numéricamente y con precisión suficiente las prestaciones de una hélice de la que no se dispone un modelo digital inicial, tan solo acceso al modelo físico. Esta situación resulta en realidad bastante habitual, ya que los fabricantes no suelen proporcionar el detalle geométrico de sus hélices. Para ello, se divide el trabajo en dos bloques. En primer lugar, se define el procedimiento de digitalización de la hélice. En este caso, se aplica un procedimiento de ingeniería inversa mediante el uso de un escáner de metrología profesional HandySCAN 700 Elite que funciona con luz láser y permite obtener una resolución en el modelo digital de 0,025 mm y una exactitud volumétrica de 0,012 mm + 0,015 mm/m. Esto permite generar un modelo digital de la hélice con el necesario nivel de detalle en regiones críticas como los bordes de ataque y salida (véase figura 1).

[1] Universidad de León.

Una vez que se dispone del modelo geométrico, se pretende analizar el funcionamiento de la hélice mediante técnicas de simulación numérica de fluidos (CFD). Con este fin, se lleva a cabo en primer lugar una validación de los posibles modelos numéricos a emplear, recurriendo, para ello, a la simulación de hélices documentadas de manera adecuada en la literatura y que operan en rangos de Reynolds claramente diferenciados, como son la NACA 4-(5)(05)-041 (Reynolds, Samonds y Walker, 1957) y la TUD-XPROP-S (van Arnhem *et al*., 2022). El procedimiento de validación permite definir tanto la estrategia de mallado y su resolución como el modelo de turbulencia más adecuado (considerando, además, para ello, el coste computacional global).

Palabras clave: CFD, Hélices, Modelos de transición.

Bibliografía:

Reynolds, R. M., Samonds, R. I. y Walker, J. H. (1957). *An Investigation of Single- and Dual-Rotation Propellers at Positive and Negative Thrust, and in Combination with a NACA 1-series D-Type Cowling at Mach Numbers up to 0.84*. Technical report 1336. NACA.

Van Arnhem, N. *et al*. (2022). Tud-xprop-s propeller geometry. Zenodo.

204 – Aceleración de simuladores marítimos mediante redes físicamente informadas y operadores neuronales para entrenamiento y validación SIL/HIL de sistemas de IA embarcada

Autores: Moreu Gamazo, Jose M.[1]; Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]; Escola, Pol[1]; García Crespo, Ricardo[1]; Liaño Diaz, Manuel[1]

Resumen. El desarrollo de sistemas autónomos de IA embarcada para USV interceptadores exige una infraestructura de simulación que cubra el ciclo completo de desarrollo: entrenamiento de los módulos de aprendizaje (percepción, seguimiento y planificación), validación *software-in-the-loop* (SIL) del *stack* integrado sobre ROS2/DDS y validación *hardware-in-the-loop* (HIL) sobre el *hardware* embarcado objetivo. Los simuladores marítimos actuales de alta fidelidad resuelven en cada paso las ecuaciones de Fossen para la dinámica del USV, los campos de oleaje, viento y corriente, la interacción casco-ola y la generación sintética de sensores. Esta rigurosidad limita el *throughput* a centenares de pasos por segundo, cuello de botella para las campañas de *deep*

[1] HI-Iberia Ingeniería y Proyectos S. L.

reinforcement learning y para el cumplimiento de los presupuestos de latencia en tiempo real durante HIL. El presente trabajo, enmarcado en el proyecto USVINT (Lote 3, CPP 02/2025), propone sustituir los núcleos físicos más costosos por modelos subrogados de *deep learning*, dando lugar a un entorno híbrido física-IA para el entrenamiento y la validación extremo a extremo del sistema SIAD-Mar. Se exploran tres familias de subrogados entrenados sobre *rollouts ground-truth* del *solver* físico y datos reales de maniobra: (i) redes neuronales físicamente informadas (PINN) para la propagación de la dinámica 3DOF del USV; (ii) operadores neuronales tipo *Fourier Neural Operator* (FNO) para la generación acelerada de campos de oleaje y corriente y (iii) arquitecturas híbridas física-ML que retienen un modelo físico reducido y aprenden el residuo a partir de datos, preservando la coherencia con las leyes de conservación. El entorno resultante habilita tres modos: entrenamiento del agente PGI a alto *throughput*, ejecución SIL del *stack* PCE+SPT+PGI sobre ROS2/DDS para validar interfaces e integración, y ejecución HIL determinista donde los subrogados garantizan los presupuestos de latencia del *hardware* embarcado. La validación contempla la comparación cruzada contra el *solver* físico, la cuantificación del *speed-up* efectivo y el impacto sobre la robustez *sim-to-real* de las políticas del sistema SIAD-Mar durante las pruebas con la plataforma USV del programa. El trabajo responde a las prioridades de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026): contribuye a los USV de la AIT 6.4.2, a la simulación para adiestramiento y gemelos digitales de la AIT 11.3 como habilitadores de entrenamiento y validación a escala, y al objetivo transversal de aplicación de la IA a defensa atendiendo a los riesgos de opacidad y falta de robustez mediante arquitecturas físicamente informadas (línea 11.5.1).

Palabras clave: Modelos subrogados, Simulación híbrida física-IA, *Software-in-the-loop* (SIL), *Hardware-in-the-loop* (HIL), Vehículos de superficie no tripulados (USV).

227 – *Fast Wargaming* – Modelos subrogados para la aceleración del *wargaming* militar

Autores: Gallardo Romero, Galo[1]; Zaera Mata, Sergio[1]; Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. El ciclo de planificación operativa militar exige evaluar múltiples Cursos de Acción (COAs) antes de comprometer fuerzas. Las simulaciones de alta fidelidad requieren minutos a horas por ejecución, convirtiendo el coste computacional en el cuello de botella del bucle OODA. Sin aceleración, el planificador decide sobre un espacio de alternativas incompleto, generando inferioridad decisional en entornos de alta presión temporal. Este trabajo propone un marco de aceleración mediante modelos de orden reducido (ROM) y modelos subrogados –aproximaciones computacionalmente ligeras que aprenden a predecir el comportamiento del simulador observando sus salidas, sin necesidad de acceder a su código fuente–. La primera contribución es una taxonomía que distingue los ROM para simuladores físicos convencionales de los ROM para simuladores de combate: a diferencia de los primeros, cuya estructura de baja dimensionalidad está garantizada por las ecuaciones gobernantes, los simuladores tácticos son cajas negras con imprevisibilidad del

[1] HI Iberia.

enemigo y espacio de estados heterogéneo. Esta diferencia determina que solo las técnicas no intrusivas –métodos de reducción espectral del espacio de estados, modelos de dinámica implícita y redes neuronales que aprenden la evolución del escenario condicionada al COA– son aplicables sin acceso al código del simulador. La aceleración del *wargaming* es reconocida como necesidad estratégica en los principales entornos de defensa avanzada. El proyecto BELLONA –desarrollado bajo el marco COINCIDENTE 2024– materializa la arquitectura propuesta: demuestra la evaluación de centenares de COA en tiempo operacionalmente viable, con resultados validados por expertos del Ministerio de Defensa. La ventaja diferencial reside en la ontología doctrinal como prior estructural, reduciendo los requisitos de datos de entrenamiento y garantizando alineación doctrinal desde el primer filtro. La segunda contribución es la arquitectura BELLONA-Flash, un *pipeline* de tres filtros de coste creciente. El primero verifica la coherencia doctrinal del COA –conforme a COPD/AJP-5– antes de cualquier ejecución computacional. El segundo estima el rendimiento probable del escenario mediante un modelo subrogado ligero, descartando rápidamente los candidatos de escasa viabilidad operativa. El tercero aplica simulación completa de alta fidelidad, reservada para los COA que superan los filtros anteriores. Este diseño en cascada garantiza que ningún COA doctrinalmente inválido consume recursos de simulación. BELLONA-Flash no es una propuesta: es un sistema en ejecución producido en el Programa COINCIDENTE. Cuarenta años de investigación en defensa convergen en una arquitectura que aborda tres prioridades de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID): la simulación y el modelado para el planeamiento operativo, la experimentación y el análisis de escenarios, y la aceleración de capacidades militares mediante inteligencia artificial.

Palabras clave: Modelos de orden reducido (ROM), *Wargaming* militar acelerado, Modelos subrogados para simulación, Cursos de acción (COA), Dinámica de combate, Apoyo a la decisión en Defensa, Simulación acelerada soberana.

273 – Desarrollo y validación de un simulador genérico 6-DOF y arquitecturas GNC para el diseño preliminar de proyectiles balísticos e hipersónicos

Autores: Calleja, Javier Alfonso[1]; Carmona, Manuel Alejandro[2]; López, Raúl[1]

Resumen. El diseño preliminar de sistemas de defensa complejos, como misiles guiados y proyectiles de artillería, exige herramientas de simulación versátiles que reduzcan costes y tiempos de desarrollo, incrementando la certidumbre en fases avanzadas. Este trabajo presenta un simulador genérico de seis grados de libertad (6-DOF), concebido como una plataforma modular, escalable y soberana para la evaluación de configuraciones aeroespaciales y estrategias de guiado, navegación y control (GNC). La arquitectura del sistema integra modelos de dinámica de vuelo, propulsión, entorno y un módulo aerodinámico de alta fidelidad. Como innovación en la gestión computacional, se ha implementado un sistema automatizado de organización de coeficientes aerodinámicos en tensores multidimensionales, optimizando el acceso a los datos durante la integración numérica. El núcleo del proyecto se centra en la implementación y evaluación de estrategias GNC. La arquitectura permite integrar tanto

[1] INTA.
[2] INTA - Campus La Marañosa, Departamento de Optoelectrónica y Misilística.

lógicas de control clásico multicanal como sistemas de control predictivo basados en un propagador dinámico, que emplea algoritmos evolutivos combinados con técnicas de optimización local para calcular perfiles de aceleración óptimos en tiempo real. Esto facilita un análisis comparativo riguroso de su eficacia frente a trayectorias balísticas, maniobras de reentrada hipersónica tipo *skip-glide* y guiado en fases terminales. Un pilar fundamental es su carácter modular basado en modelos referenciados. Esta estructura permite desarrollar y validar subsistemas de forma independiente, asegurando que las modificaciones en un módulo no afecten al resto. Esta independencia facilita el trabajo colaborativo entre diferentes equipos y garantiza la escalabilidad del proyecto, permitiendo su adaptación a nuevas funcionalidades y su reutilización desde el diseño conceptual hasta la integración *hardware* en el lazo de control (HIL). La validación técnica se realizó mediante un modelo conceptual de misil hipersónico. Los resultados demuestran la capacidad del simulador para reproducir perfiles exoatmosféricos y maniobras críticas de reentrada, evaluando el comportamiento del misil frente a condiciones extremas. En conclusión, la plataforma facilita la gestión colaborativa y la interoperabilidad entre equipos, consolidándose como un entorno de referencia para la cooperación estratégica en el ámbito de la defensa. Al integrar el conocimiento de diversos actores del sector en un modelo de misión común, el proyecto impulsa la transferencia tecnológica y el desarrollo de capacidades defensivas soberanas.

Palabras clave: Reentrada, Control, Simulación, *Matlab*, *Simulink*, Cohete, Misil.

11.4
Seguridad de sistemas e información

3 – Agentes autónomos de inteligencia artificial en operaciones cibernéticas ofensivas: técnicas, integración doctrinal e implicaciones éticas para las Fuerzas Armadas

Autores: Muñoz Pairet, Pau[1]; Urrutia Normandin, Cristian[2]; Arias Noguerales, María Teresa[3]

Resumen. La incorporación de agentes de inteligencia artificial autónoma en el dominio cibernético introduce una ruptura cualitativa en la naturaleza de las operaciones ofensivas. A diferencia de las herramientas tradicionales de ataque, los agentes autónomos son capaces de razonar sobre el entorno, adaptar su comportamiento ante contramedidas defensivas, encadenar técnicas de explotación sin intervención humana y operar dentro de horizontes temporales inaccesibles para el analista convencional. Esta tendencia, ya documentada en ciberejercicios tipo *capture the flag* (CTF) y en investigación académica publicada, plantea desafíos operacionales y doctrinales inmediatos para las Fuerzas Armadas y los organismos de ciberseguridad nacional. Esta comunicación analiza el estado del arte en el empleo de modelos de lenguaje de gran escala (LLM) y

[1] lobera.ai, Universidad Pontificia de Comillas.
[2] INDRA, Universidad Pontificia de Comillas.
[3] Universidad Autónoma de Madrid.

sistemas multiagente en operaciones de red ofensivas, describiendo técnicas concretas: reconocimiento autónomo de superficie de ataque, generación y adaptación dinámica de *exploits*, evasión de sistemas de detección basados en reglas y comportamiento, y automatización de cadenas de compromiso complejas. Se presentan resultados obtenidos en entornos controlados que ilustran la viabilidad operacional de estas capacidades en escenarios de uso dual. A continuación, se examina cómo dichas capacidades pueden integrarse en marcos doctrinales existentes, con referencia al concepto OTAN de Cyberspace Operations, al marco de autonomía en sistemas de armas (LAWS) y al régimen jurídico del derecho internacional humanitario aplicado al ciberdominio. Se identifican los niveles de autonomía admisibles en función del grado de supervisión humana requerido y del tipo de objetivo, distinguiendo entre operaciones en redes militares y en infraestructuras civiles de uso dual. Finalmente, se abordan las implicaciones éticas derivadas de la delegación de decisiones con efectos cinéticos o cuasicinéticos en sistemas autónomos, con especial atención a los principios de distinción, proporcionalidad y precaución. La comunicación concluye con una propuesta de marco de referencia para la evaluación de riesgos en el despliegue de IA autónoma en operaciones cibernéticas, orientado a apoyar la toma de decisiones en el nivel operacional y estratégico de las Fuerzas Armadas españolas y en el contexto de la ciberdefensa colectiva de la Alianza Atlántica.

Palabras clave: Inteligencia artificial autónoma, Operaciones ofensivas en el ciberdominio, Agentes LLM, Autonomía y supervisión humana, Doctrina ciber-OTAN, Ética militar en IA, Ciberdefensa.

60 – Modelo estadístico de Bernoulli aplicado a las respuestas de funciones no clonables físicamente (PUF) en seguridad *hardware*

Autores: Díez-Senorans, Guillermo[1]; Sicignano, Domenico[1]; Mosteo-Chagoyen, Alejandro[2]; García-Bosque, Miguel[2]; Aparicio-Téllez, Raúl[2]; Celma, Santiago[2]

Resumen. Este trabajo introduce un modelo estadístico de PUF cuasideal, capaz de superar algunas de las limitaciones encontradas en las pruebas estadísticas convencionales utilizadas para caracterizar esta disruptiva tecnología de seguridad del *hardware*. El modelo propuesto se basa en la distribución de Bernoulli para capturar el ruido real de los bits de respuesta, superando las suposiciones de comportamiento ideal habituales en la literatura especializada. La metodología seguida emplea el estadístico de Kolmogorov-Smirnov y simulaciones en Python para validar la cuasidealidad en implementaciones físicas. Los resultados, validados con repositorios públicos de medidas PUF, demuestran la capacidad del modelo para detectar correlaciones internas y proporcionar una

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.
[2] Universidad de Zaragoza.

caracterización rigurosa de métricas críticas como la unicidad, fiabilidad e identificabilidad de los sistemas criptográficos.

Palabras clave: Funciones no clonables físicamente, Internet de las cosas, Modelado estadístico, Seguridad de la información, Seguridad *hardware*.

64 – Energía táctica y ciberseguridad. Necesidades operativas, riesgos emergentes y transferencia tecnológica sectorial

Autores: Torres, Jesús[1]; Galve, Yasmina[1]; Gutiérrez, Esteban[1]

Resumen. La guerra moderna ha convertido la energía táctica en un factor operativo decisivo. El conflicto en Ucrania demuestra que las unidades incapaces de gestionar el suministro eléctrico a nivel de pelotón y compañía sufren degradación del mando, reducción de la letalidad y pérdida de supervivencia. Antes incluso de la acción enemiga, la electricidad no fue planificada y protegida como el recurso operativo crítico en el que se ha convertido. Una publicación reciente, del CALL (Center for Army Lessons Learned, Kansas, EE. UU.) y miembros de las Fuerzas Armadas de Polonia, expone estas necesidades (*Powering the Front: Tactical Energy Delivery and Management in the Ukraine War*). Se recomienda el despliegue de sistemas de gestión de baterías, nodos de supervisión IoT, sistemas automáticos de corte de carga, controladores de microrred o microrredes modulares en el frente de combate. Son conclusiones fundamentadas en evidencia operativa del conflicto armado más intensivo digitalmente de la historia reciente. Estos recursos implican interfaces digitales y, por tanto, superficies de posibles ataques cibernéticos. Por

[1] CIRCE Technology Centre.

ejemplo, la manipulación de gestores de baterías puede notificar capacidad falsa o deshabilitar de ciclos de carga en un momento crítico. Nodos de supervisión IoT para gestión de una microrred controlados remotamente por un adversario pueden impactar la red energética. Descuidar esta vista de ciberseguridad, ataques no cinéticos y efectos ciberfísicos puede introducir efectos de segundo orden tan graves como las carencias que los motivaron. El sector energético civil lleva años resolviendo problemas análogos a los que emergen en la gestión de energía táctica. Los retos de seguridad y resiliencia en la red eléctrica o infraestructuras críticas parten de activos de comunicaciones operacionales heterogéneos en tecnología y protocolos, dispositivos de campo con conectividad no garantizada que deben mantener su integridad, o arquitecturas de control distribuido donde nodos comprometidos propagan fallos en toda la red. Los autores del centro tecnológico CIRCE trasladarán su experiencia con soluciones en estos dominios (evaluación dinámica de riesgos cibernéticos en energía, detección de intrusiones basada en protocolos de comunicación específicos, integridad de *firmware* de dispositivos de campo, etc.). La comunicación argumentará que una transferencia estructurada de esta experiencia al dominio táctico es factible y necesaria. Se mapearán resultados civiles sectoriales frente al ecosistema de dispositivos extraíble de la experiencia en Ucrania y se explorarán las brechas de adaptación: recursos directamente transferibles, modificaciones requeridas y necesidades de investigación.

Palabras clave: Ciberseguridad, Energía, Resiliencia, Sector energético, Riesgos cibernéticos, Sistemas ciberfísicos, Riesgos ciberfísicos, IoT, Microrredes.

74 – Sistemas reales adaptativos de engaño táctico y detección temprana para generación de inteligencia de amenazas y ciberaprendizaje ofensivo/defensivo

Autores: García, Álvaro[1]; Rodríguez, Enrique[1]; Dueñas, Juan[1]; Uribe, Karen[1]

Resumen. El programa COMANDO (Red de Excelencia en Tecnologías Duales para la Resiliencia e Integración de Sistemas Autónomos en entornos multidominio), aborda la investigación de metodologías de ciberresiliencia embarcada y mecanismos avanzados de ciberprotección con algoritmos de predicción basados en modelos de engaño táctico. Uno de sus objetivos es la investigación de soluciones que permitan a diferentes plataformas autónomas actuar con independencia táctica, integrando cargas útiles inteligentes con algoritmos de decisión local para reaccionar de manera temprana y resistir intentos de degradación o ciberataque. Con este trabajo se pretende el despliegue de un *framework* real embarcado que incluye una caracterización físico-digital adaptativa de plataformas operativas y sistemas de engaño táctico (*deception*). A partir de la investigación de metodologías de generación de conocimiento predictivo con

[1] Fundacion CIDAUT.

la monitorización pasiva de tráfico de red en tiempo real, y el análisis de huellas de amenaza, se persigue el desarrollo de modelos expertos con inteligencia artificial para detectar y almacenar de forma automática las tácticas, técnicas y procedimientos de ataque dirigidos de forma específica a diferentes plataformas multidominio. La utilización de estos patrones de ataques reales como base de conocimiento defensivo, permite la creación de nuevos indicadores de amenaza para la detección proactiva y respuesta ante ciberataques. El tratamiento de las amenazas se realiza mediante funciones de aprendizaje automático y de detección, con un entrenamiento a partir del contexto de seguridad de diferentes plataformas evaluadas, parámetros de seguridad e incidentes previos con la predicción de situaciones de riesgo y un grado de verosimilitud que evoluciona de acuerdo con el grado de aprendizaje del sistema. Cada indicador de comportamiento de un ataque o de las diferentes etapas que conforman el mismo, se codifica con una función resumen *hash* o huella digital que contiene datos de protocolo y comunicaciones de red, donde el estudio de los indicadores permite reconocer y etiquetar un patrón de interacción. Una novedad del *framework* es que permite al mismo tiempo implementar módulos avanzados dentro del escenario de operación para el entrenamiento de estrategias ofensivas en un entorno no destructivo. Para ello, el sistema permite desplegar diferentes entornos físicos o virtuales caracterizados sobre las plataformas y protocolos presentados con la exposición de distintas vulnerabilidades, donde es posible la utilización de medios de amenaza catalogados o de nueva creación para la ejecución de ataques y ejercicios de ciberaprendizaje.

Palabras clave. Inteligencia de amenazas, Ciberresiliencia, Engaño táctico, Aprendizaje automático, Detección temprana.

81 – D²-BALUARTE: supervisión avanzada de sistemas auxiliares críticos mediante inspección profunda de protocolos y gemelos digitales en el buque de guerra

Autores: Lamas Vigo, Javier[1]; Munín Doce, Alicia[1]; Vieira Lorenzo, Ricardo[2]; Muñoz Mellid, Jaiver[2]

Resumen. Los actuales sistemas auxiliares navales están basados en estándares industriales y dependen tanto de redes OT complejas como de dispositivos de control suministrados por terceros, cuyo funcionamiento no siempre es transparente o accesible para los integradores u operadores finales. En las arquitecturas SCADA tradicionales, es necesario monitorizar de modo conjunto los datos internos enviados por estos sistemas y los sensores externos vinculados a las variables de proceso con el que están relacionados, sin realizar una validación basada en el comportamiento físico esperado del sistema. Como consecuencia, tanto fallos accidentales como degradaciones progresivas, errores de programación o manipulaciones intencionadas del tráfico de control pueden dar lugar a condiciones de funcionamiento anómalas sin que aparezcan desviaciones relevantes en estas variables de proceso supervisadas. Este trabajo propone la

[1] Universidade da Coruña, CITENI.
[2] Anta Norte, S. L.

combinación de dos elementos complementarios, un sistema de inspección profunda de protocolos industriales (DPI) y un gemelo digital del sistema físico, para mitigar este problema. Por un lado, el DPI permite copiar y redirigir el tráfico al gemelo digital, analizar el tráfico de control y localizar automáticamente anomalías mediante la búsqueda de patrones de comunicación inusuales, lo que permite detectar cambios en el comportamiento del sistema con independencia de su origen, ya sea legítimo, accidental o intencionado. Por otro lado, el gemelo digital, cuando recibe los comandos y valores procedentes de los sensores externos, permite simular el comportamiento físico del sistema y comprobar si es equivalente al real, proporcionando una herramienta de validación complementaria a la visualización en SCADA. Como caso de estudio, se propone el de un sistema compuesto por una pareja de bombas hidráulicas redundantes. Se muestra cómo la alteración de determinados comandos de control puede inducir condiciones de cavitación sin modificar la presión aguas abajo, manteniendo las variables monitorizadas en rangos nominales. Este comportamiento resultaría invisible en sistemas que dependen únicamente de información interna proporcionada por los dispositivos de control, mientras que en el caso de la integración del DPI con el gemelo digital es posible correlacionar patrones de tráfico anómalos con la respuesta simulada, inferir estados del sistema que este no mide (como la presencia de cavitación) y detectar de forma temprana desviaciones en el funcionamiento antes de que se produzcan daños irreversibles. Los resultados demuestran que esta aproximación constituye un elemento clave para reforzar la supervisión avanzada de sistemas OT, mejorando la resiliencia operativa, el mantenimiento predictivo y evitando la degradación de capacidades de combate en caso de ciberataque.

Palabras clave: OT *cybersecurity*, *Deep packet inspection*, *Anomaly detection*, *Control traffic analysis*, *Digital twin validation*.

120 – Evaluación de la robustez de modelos de detección de objetos en vehículos marinos semiautónomos

Autores: Miranda-García, Alberto[1]; Palacios Prados, M.ª Carmen[1]; Brazal Cortaberria, Nagore[1]; Álvarez Piernavieja, Maite[1]; Doblado Perez, Ángel[1]

Resumen. La inteligencia artificial está transformando el mundo de las plataformas navales, permitiendo que barcos y buques mejoren su capacidad para navegar de forma semiautónoma o teleasistida a través de una mejor percepción de su entorno, la automatización de ciertos procesos o el apoyo en la toma de decisiones complejas. Esto supone una creciente dependencia de modelos de aprendizaje automático, lo que introduce nuevas superficies de ataque que pueden ser explotadas, comprometiendo la seguridad y fiabilidad de los sistemas embarcados. En particular, los modelos de detección de objetos y segmentación de imágenes, ampliamente utilizados en tareas de vigilancia y ayuda a la navegación, son en especial vulnerables a ataques adversarios que pueden alterar su comportamiento. La actividad que se va a presentar en este congreso está englobada en un proyecto europeo denominado «WARRaNT - WAterborne fedeRated systems and models for secuRe and resilieNT operations». WARRaNT tiene como objetivo garantizar la confiabilidad, seguridad y

[1] TECNALIA Research & Innovation.

ciberresiliencia de los sistemas digitales marítimos. En este proyecto, no se habla solo de proteger datos, sino también de proteger las decisiones físicas que toman las plataformas navales autónomas o semiautónomas basándose en la inteligencia artificial. Dentro del marco de este proyecto, se presenta el diseño, implementación y validación de un conjunto de ataques adversarios dirigidos a modelos de inteligencia artificial en escenarios marítimos. Estos ataques permiten analizar diferentes vectores de amenaza que pueden impactar en la degradación de la capacidad de detección de objetos y, por tanto, en la creación de falsas percepciones del entorno que pueden conllevar riesgos de seguridad física y operativa en el control de la navegación de la plataforma naval. Para facilitar la ejecución sistemática de pruebas de *pentesting* sobre modelos de visión artificial, se han desarrollado unos entornos de experimentación que permiten evaluar su robustez frente a perturbaciones muchas veces imperceptibles por ojo humano y que han sido diseñadas con el propósito de causar daños. Los resultados en este proyecto muestran la necesidad de incorporar mecanismos específicos de defensa, así como la adopción de metodologías de evaluación continua que permitan anticipar y mitigar este tipo de amenazas. En definitiva, este trabajo contribuye al desarrollo de capacidades para la identificación y análisis de vulnerabilidades en sistemas inteligentes, reforzando su resiliencia en entornos potencialmente hostiles y críticos.

Palabras clave: Plataformas navales autónomas, Aprendizaje automático, Detección de objetos, Ataques adversarios.

189 – El ciberoperador militar: perfil doctrinal para el combatiente de ciberdefensa español

Autores: Legaz Sanz, Antonio[1]; Sotelo Monge, Marco Antonio[1]; Maestre Vidal, Jorge[1]

Resumen. El ciberespacio como quinto dominio operacional exige repensar el sistema combatiente español. Aunque el Mando Conjunto del Ciberespacio (MCCE) lleva operativo desde 2021, España carece de un perfil doctrinal consolidado del ciberoperador militar que lo integre plenamente como elemento del combatiente conjunto. Este trabajo analiza las cualidades específicas del ciberoperador (cognitivas, técnicas, operacionales y psicológicas) requeridas para operaciones ofensivas y defensivas en entornos multidominio. Mediante comparación de modelos aliados (USCYBERCOM, ANSSI francesa, NCSC británico), identifica competencias troncales adaptables al contexto español: dominio técnico multidominio, razonamiento bajo incertidumbre, toma de decisiones ético-operacionales y resiliencia cognitiva prolongada. Se propone un marco preliminar de competencias estructurado en tres niveles (táctico, operacional, estratégico), alineado con el sistema combatiente de las FAS y los requisitos OTAN de interoperabilidad. El análisis evalúa desafíos institucionales (reclutamiento, formación, retención frente al sector privado) y mecanismos de implementación: modificación doctrinal, itinerarios

[1] Indra Sistemas.

formativos en centros CUD/ESMOI y colaboración público-privada con industria BTID. El perfil doctrinal del ciberoperador no solo fortalece las capacidades del MCCE, sino que posiciona a España como referente en la definición del combatiente del siglo XXI, contribuyendo a la autonomía estratégica europea en ciberdefensa.

Palabras clave: Ciberespacio, Cibercombatiente, MCCE, Perfil, Ciberdefensa.

192 – Arquitectura multiagente soberana para análisis forense verificable en ciberdefensa

Autores: López-Bosque, Irene[1]; Hoyo, Rafael del[1]

Resumen. La creciente complejidad de los ciberataques contra infraestructuras críticas, sistemas corporativos y entornos de defensa exige nuevas capacidades de análisis forense automatizado que no solo permitan detectar actividad maliciosa, sino también reconstruir, explicar y verificar las trayectorias de decisión que conducen a una conclusión operativa. En este trabajo, se presenta una arquitectura multiagente para ciberseguridad forense basada en modelos de lenguaje de gran tamaño desplegables sobre infraestructura propia, orientada a preservar la soberanía tecnológica y la confidencialidad de la información procesada. La propuesta se basa sobre el trabajo desarrollado en el proyecto MAKRINOS, una iniciativa de análisis forense digital financiada en el marco de proyectos de innovación de INCIBE, centrada en combinar análisis automático y motores de razonamiento basados en inteligencia artificial para identificar, preservar y recuperar evidencias tras ciberataques, detectar nuevas técnicas de

[1] ITA.

ataque y generar contramedidas. El artículo presentará parte de los resultados del proyecto MAKRINOS, que constituye un caso de uso especialmente adecuado para evaluar esta arquitectura, al tratarse de un ecosistema forense orientado a automatizar el análisis de incidentes, reducir la carga operativa de los analistas y apoyar la generación de respuestas adaptadas ante brechas de seguridad. La contribución principal del artículo consiste en describir una arquitectura multiagente en la que distintos agentes especializados cooperan para clasificar eventos, reconstruir secuencias de ataque, contrastar evidencias, mapear comportamientos frente a marcos como MITRE ATT&CK y generar explicaciones forenses auditables, explicando los resultados obtenidos hasta la fecha. Además, se explicará la investigación actual que se está realizando hoy día en incorporar una capa de verificación del razonamiento basada en Virtualens, entendida como un módulo de inspección interpretable inspirado en técnicas de análisis capa a capa con Tuned Lens. Esta capa permite analizar las trayectorias internas del modelo durante la generación de la explicación, evaluando la evolución de la incertidumbre, la convergencia de la respuesta, la divergencia entre estados intermedios y salida final, y la dependencia funcional de los pasos de razonamiento producidos por el propio sistema. El enfoque se apoya en técnicas de interpretabilidad estudiadas en trabajos recientes sobre modelos de lenguaje ajustados mediante aprendizaje por refuerzo. Permitiendo garantizar que tecnologías extrajeras en este sector garanticen la soberanía de la respuesta alcanzada por estos modelos de caja negra. Aplicado a MAKRINOS, este enfoque permite ir más allá de la generación de una explicación narrativa del incidente. La plataforma podría verificar si la respuesta producida por los agentes se apoya realmente en las evidencias forenses disponibles, si la trayectoria de razonamiento es consistente con la secuencia de ataque reconstruida, si existen saltos injustificados en la inferencia y si la conclusión final se ha formado mediante un proceso estable y trazable. Esta capacidad resulta especialmente relevante en entornos de defensa, donde no basta con disponer de modelos eficaces, sino que es necesario garantizar que las decisiones automatizadas puedan ser verificadas, auditadas y ejecutadas sin exponer información

sensible a infraestructuras externas. La combinación de arquitectura multiagente, modelos locales, interpretabilidad y despliegue sobre infraestructura soberana permite avanzar hacia sistemas de ciberdefensa explicables, controlables y alineados con los requisitos de confidencialidad, trazabilidad y soberanía nacional. En este sentido, las investigaciones presentadas no solo como una plataforma de análisis forense automatizado, sino como un entorno de experimentación para validar nuevas técnicas de verificación del razonamiento en sistemas críticos de inteligencia artificial aplicada a defensa.

Palabras clave: Automatización de respuesta ante ciberataques, Análisis forense digital, Ciberdefensa, Ciberinteligencia, Detección de amenazas avanzadas persistentes, Atribución técnica de ciberataques, Aprendizaje automático aplicado a ciberseguridad, Modelos *Zero Trust*, Predicción de vulnerabilidades, Resiliencia operativa, Inteligencia artificial explicable, Arquitecturas multiagente.

250 – SEPCIA: sistema de evaluación de protocolos criptográficos asistido por inteligencia artificial generativa

Autor: Vidal, Francisco[1]

Resumen. La criptografía constituye un pilar esencial para la seguridad de los sistemas informáticos y de telecomunicaciones, ya que garantiza la confidencialidad, integridad y autenticidad de los datos. Sin embargo, las implementaciones prácticas de protocolos criptográficos pueden desviarse de los estándares establecidos, generando vulnerabilidades explotables. Por ello, resulta crucial desarrollar metodologías robustas para la auditoría y evaluación de dichas implementaciones, abarcando aspectos como la conformidad normativa, la interoperabilidad, el rendimiento, las configuraciones y el análisis del código fuente. En este contexto, la integración de inteligencia artificial (IA) generativa —especialmente modelos de lenguaje avanzados– surge como una oportunidad para transformar los procesos tradicionales de evaluación de seguridad. Estos modelos permiten automatizar el análisis de documentación técnica, detectar patrones anómalos que podrían pasar desapercibidos en revisiones manuales, verificar cumplimiento de estándares (por ejemplo, NIST o ISO) y simular escenarios de ataque de forma eficiente y escalable. A diferencia de los

[1] INTA.

entornos físicos de prueba, las soluciones basadas en IA reducen costes, tiempos y recursos, al tiempo que permiten explorar un número mayor de configuraciones y variantes de implementación. No obstante, su aplicación efectiva depende de controlar la variabilidad inherente a los modelos generativos, originada por factores como la aleatoriedad en el entrenamiento, la calidad y coherencia de los datos de entrada, el diseño de los *prompts* y las actualizaciones continuas de los modelos. Esta investigación propone un enfoque sistemático para evaluar dicha variabilidad y definir umbrales aceptables de reproducibilidad en el análisis criptográfico, con el fin de establecer una metodología validada que incorpore IA como soporte en la evaluación de protocolos criptográficos implementados. La metodología propuesta contempla: análisis comparativo de tecnologías y protocolos criptográficos, caracterización de modelos de IA generativa según su estabilidad y fiabilidad, optimización de técnicas para minimizar la incertidumbre en las respuestas; diseño de flujos automatizados para generación de casos de prueba, ejecución de simulaciones y análisis de resultados, y validación empírica mediante casos de estudio. Los resultados esperados contribuirán a la creación de herramientas y prácticas reproducibles, orientadas a mejorar la seguridad real de los sistemas en entornos críticos, y sentarán las bases para una nueva generación de auditores asistidos por IA, capaces de adaptarse a la evolución continua de los protocolos y amenazas cibernéticas.

Palabras clave: Criptografía, Inteligencia artificial, Seguridad de la información.

260 – SACIA: sistema de auditoría de ciberseguridad asistido por inteligencia artificial

Autor: González Llorente, Víctor[1]

Resumen. SACIA es una plataforma autónoma de auditoría de ciberseguridad ofensiva que integra una arquitectura multiagente orquestada mediante una variante de OpenCode, combinando recuperación de conocimiento contextual mediante RAG con la ejecución aislada de herramientas de *pentesting* sobre contenedores Docker Kali para llevar a cabo evaluaciones técnicas trazables, reproducibles y soberanas. El sistema introduce un *harness* de evaluación específico que automatiza campañas sobre máquinas tipo HackTheBox y laboratorios propios, definiendo objetivos claros (*user/root*, *flags*), restricciones operativas (ROE, límites de tiempo y coste) y métricas cuantitativas de efectividad, eficiencia y seguridad operacional, de forma que los modelos puedan compararse bajo condiciones estrictamente controladas. Este *harness* permite enfrentar modelos locales de menor tamaño, desplegados sobre infraestructuras propias, con modelos de referencia de alta capacidad como Opus 4.6, de Anthropic, manteniendo constante la orquestación de agentes y el conjunto de herramientas (nmap, sqlmap, Metasploit, etc.) para evaluar hasta

[1] INTA.

qué punto una buena arquitectura agéntica y un uso intensivo de *tool-calling* pueden compensar la menor potencia bruta del modelo. La propuesta está especialmente orientada a entornos restrictivos y de alta sensibilidad –como buques, bases militares o infraestructuras críticas– donde la soberanía del dato, la ausencia de dependencia de servicios externos y la capacidad de auditar el comportamiento del sistema son requisitos fundamentales, ofreciendo un marco práctico para avanzar hacia auditorías semiautónomas en escenarios de *red team* realistas

Palabras clave: Ciberseguridad ofensiva, Inteligencia artificial, Agentes autónomos de IA, Modelos de lenguaje locales.

261 – UMBRA: protección y supervisión de enlaces RS485/Modbus RTU en sistemas auxiliares críticos de buques de guerra

Autores: García García, Francisco Javier[1]; Lamas Vigo, Javier[2]

Resumen. Los sistemas auxiliares embarcados en buques de guerra se apoyan en tecnologías de automatización industrial, como los enlaces RS485 y el protocolo Modbus RTU, para la transmisión de consignas, estados y alarmas. Estos mecanismos fueron concebidos bajo el supuesto de entornos físicamente controlados, con acceso restringido al cableado y sin considerar modelos de amenaza activa, por lo que carecen de funciones de seguridad avanzadas, lo que introduce vulnerabilidades cuando se despliegan en entornos de defensa. En la práctica, la restricción del acceso físico al cableado constituye una línea de defensa sólida ampliamente implementada en plataformas navales. No obstante, en determinados escenarios operativos dicha protección puede resultar insuficiente frente a manipulaciones deliberadas del bus. La ausencia de mecanismos de detección y protección embebidos en la propia comunicación incrementa así el riesgo operativo. En otros dominios de seguridad, esta problemática ha sido abordada mediante estándares que incorporan supervisión

[1] Integraciones Técnicas de Seguridad S. A.
[2] Universidade da Coruña, CITENI.

del enlace y protección criptográfica como requisitos de diseño, como es el caso de OSDP en sistemas de control de accesos. Sin embargo, en el ámbito OT naval existe una elevada dependencia de dispositivos suministrados por terceros, cuyo comportamiento interno no siempre resulta accesible o auditable por los integradores y operadores finales. Las soluciones comerciales existentes de seguridad para resolver este problema suelen ser de origen extracomunitario, con costes elevados y arquitecturas opacas. Este trabajo presenta UMBRA (Unidad ModBus RTU Antintrusiones) como propuesta alternativa de innovación y desarrollo orientada a la protección de enlaces RS485/Modbus RTU en plataformas en servicio. La aproximación se basa en la interposición de elementos de supervisión y protección a ambos extremos del enlace, concebidos para operar de forma transparente respecto a los equipos existentes y sin requerir modificaciones en los dispositivos de campo. Estos elementos permitirían monitorizar el estado eléctrico y temporal del bus, detectar manipulaciones o inyecciones no autorizadas, y proteger la mensajería intercambiada mediante mecanismos de integridad y autenticación compatibles con infraestructuras ya desplegadas. La arquitectura propuesta persigue reducir la superficie de ataque mediante una solución robusta y auditable, reforzando la resiliencia operativa. Como apoyo a la validación de la necesidad, se consideran escenarios de impacto operativo. En sistemas de contraincendios, la alteración del tráfico de control puede generar falsas alarmas o cierres indebidos de zonas, afectando a la gestión de emergencias. En sistemas de bombeo y circulación térmica, modificaciones persistentes de consignas pueden inducir regímenes que provocan efectos físicos dañinos sobre los equipos.

Palabras clave: OT *cybersecurity*, RS485/Modbus RTU, *Critical auxiliary systems*, *Physical layer monitoring*, *Operational Re*.

11.5
Aplicación a Defensa de avances en tecnologías TIC

111 – Sistemas multiagente híbridos LLM-SLM con coordinación distribuida en entornos tácticos

Autores: Martínez, Ángel[1]; Martínez Heredia, Antonio Manuel[2]; Ochando Terreros, Francisco José[3]; Martínez, Javier[2]; Velasco, Miguel[1]

Resumen. El creciente protagonismo de la IA agéntica y de los sistemas multiagente refleja una evolución relevante en inteligencia artificial, impulsada por los avances en IA generativa y *large language models* (LLM). Estos sistemas permiten arquitecturas más autónomas y especializadas, capaces de ejecutar tareas complejas con menor intervención humana. En paralelo, los *small language models* (SLM) emergen como un componente clave en entornos tácticos o con recursos limitados, donde la latencia, el consumo energético y la capacidad de cómputo son factores críticos. Frente a los LLM, los SLM ofrecen inferencia más rápida y despliegue eficiente en dispositivos embebidos o en el *edge*, habilitando inteligencia distribuida y resiliente. Este trabajo analiza la integración de LLM y SLM dentro de marcos de IA agéntica aplicados a entornos tácticos, con especial atención a casos de uso operacionales donde agentes autónomos

[1] ISDEFE S. A.
[2] Centro de Tecnologías Emergentes del Ejército de Tierra (CTEET).
[3] INTA - CETEDEX.

mejoran la toma de decisiones, la coordinación y el acceso a herramientas y datos. Para ello, se introducen dos protocolos fundamentales: el Model Context Protocol (MCP), que conecta agentes con herramientas externas y fuentes de datos, ampliando su capacidad operativa y el Agent Context Protocol (ACP), que define los mecanismos de comunicación y colaboración entre agentes, habilitando ecosistemas distribuidos e interoperables. Se propone una arquitectura desplegable orientada a entornos de misión, implementable en servidores locales y accesible mediante API REST sobre HTTP. Esta arquitectura se estructura en torno al ACP como mecanismo de coordinación entre agentes, y permite un enfoque híbrido en el que los LLM proporcionan soporte avanzado a la decisión a nivel centralizado, mientras que los SLM operan en dispositivos embebidos del usuario final. Este diseño busca maximizar flexibilidad, escalabilidad y resiliencia en escenarios con recursos limitados o condiciones adversas. Como contribución principal, se presenta un ecosistema colaborativo de agentes, coordinados mediante un orquestador, basado en asignación dinámica de tareas y ciclos iterativos de coordinación multiagente. En este modelo, los agentes no operan en cadenas lineales, sino que interactúan mediante ACP, intercambian información en bucles cortos y construyen conjuntamente soluciones a problemas operativos. El sistema se evalúa mediante métricas de latencia, robustez ante entradas incompletas y capacidad de degradación ante fallos de agentes. El objetivo final es habilitar ecosistemas interoperables de IA agéntica en entornos colaborativos y multinacionales, garantizando integración segura de herramientas, coordinación eficiente entre agentes distribuidos e intercambio fluido de información para mejorar la capacidad operativa en entornos complejos.

Palabras clave: IA agéntica, Sistemas multiagente, MCP, ACP, Arquitectura desplegable, Entornos tácticos.

112 – Estudio de implantación de un sistema de gestión de inteligencia artificial conforme a ISO/IEC 42001 en el Centro de Tecnologías Emergentes del Ejército de Tierra (CTEET)

Autores: Martínez, Ángel[1]; Martínez Heredia, Antonio Manuel[2]; Martínez, Javier[2]; Velasco, Miguel[1]

Resumen. La creciente relevancia de la inteligencia artificial en el ámbito militar exige la adopción de mecanismos estructurados que garanticen su desarrollo, evaluación y uso de forma segura, ética y eficaz. En este contexto, se propone la implantación de un sistema de gestión de la IA basado en el estándar ISO/IEC 42001 en el Centro de Tecnologías Emergentes del Ejército de Tierra (CTEET), con el objetivo de dotar a la organización de un marco coherente para gobernar todo el ciclo de vida de las soluciones basadas en IA. Esta iniciativa no se concibe como un ejercicio de cumplimiento normativo, sino como una palanca para mejorar la calidad de la experimentación, reducir riesgos operativos y facilitar la transición de capacidades desde entornos experimentales hacia su posible adopción en operaciones reales. El enfoque propuesto integra principios de gestión

[1] ISDEFE S. A.
[2] Centro de Tecnologías Emergentes del Ejército de Tierra (CTEET).

del riesgo alineados con referencias como ISO 31000 y marcos específicos como el «NIST AI Risk Management Framework», adaptándolos a las particularidades del entorno militar. La propuesta se articula en torno a tres ejes principales: 1) El establecimiento de un modelo de gobernanza de la IA que defina roles, responsabilidades y mecanismos de supervisión, garantizando la trazabilidad y la rendición de cuentas. 2) La definición de un ciclo de vida estructurado para los sistemas de IA, que abarque desde el diseño y la gestión de datos hasta la validación, el despliegue y la monitorización en entornos controlados. 3) La implantación de un enfoque sistemático de gestión de riesgos que contemple tanto aspectos técnicos como operativos, legales y éticos. Asimismo, se contempla una implantación progresiva, comenzando con proyectos piloto en el entorno de experimentación, lo que permitirá ajustar los procesos y asegurar su viabilidad antes de su escalado. Este enfoque iterativo facilitará la adopción por parte de los equipos técnicos y operativos, evitando una sobrecarga burocrática y fomentando una cultura de uso responsable de la IA. En conjunto, esta propuesta persigue posicionar al centro como un referente en la integración segura y eficaz de la inteligencia artificial en el ámbito terrestre, alineando la innovación tecnológica con los principios de responsabilidad, control y superioridad operativa.

Palabras clave: Sistema de gestión de la IA, ISO/IEC 42001, CTEET, Gobernanza de la IA, Sistemas de IA, IA responsable.

160 – Soberanía tecnológica en plataformas de IA para Defensa: reentrenamiento de modelos de análisis de imágenes satelitales con datos militares soberanos

Autores: Naranjo Martínez, Manuel[1]; Ciruelo Sanz, Luis[1]; Chaparro Parra, Víctor[1]; Pita Lopez, Juan[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) establece la soberanía tecnológica como condicionante estratégico, definida como la capacidad de controlar la cadena de valor y el ciclo de vida de las tecnologías críticas. En el ámbito de la inteligencia artificial aplicada al análisis de imágenes satelitales, esta soberanía depende de forma determinante del control sobre los datos de entrenamiento de los modelos de *deep learning*. El proyecto EVOS (Evolución del Demostrador SEDA), contratado por la SDGPLATIN del Ministerio de Defensa en el marco del programa COINCIDENTE, implementa una metodología de reentrenamiento en la que los modelos de análisis geoespacial se especializan con datos soberanos procedentes del satélite PAZ en banda X, catálogos SATCEN y GUIA, y fuentes comerciales de alta resolución contratadas soberanamente (Airbus OneATLAS, Planet o

[1] HI-Iberia Ingeniería y Proyectos.

MAXAR a resoluciones entre los 0,3 m/px y 1,5 m/px). Esta aproximación reduce la dependencia de *datasets* genéricos civiles extranjeros que comprometen tanto la precisión operativa como la autonomía estratégica. La metodología se articula en un ciclo *human-in-the-loop*, donde analistas de inteligencia del entorno marítimo, aéreo y terrestre validan, corrigen y enriquecen las detecciones automáticas, generando *datasets* operativos de las zonas de interés estratégico de España y sus entornos de operación. Se implementan mecanismos de evaluación de concordancia entre anotadores para identificar discrepancias sistemáticas y reducir sesgos cognitivos en el proceso de validación experta. El ciclo completo (detección → validación → reetiquetado → reentrenamiento → redespliegue) se gestiona mediante pipelines de MLOp con trazabilidad y versionado integral. Los resultados cuantitativos del reentrenamiento —mAP, precisión y *recall* desglosados por dominio (marítimo, terrestre, aéreo) y resolución (Sentinel-2 a 10 m, VHR a 0,3-1,5 m)— se presentarán en el *paper* completo sobre la base de los *benchmarks* formales actualmente en curso, con una mejora esperada del orden de 5-15 puntos porcentuales en mAP respecto a los modelos base entrenados con *datasets* genéricos, en línea con los rangos reportados en la literatura de *domain adaptation* para *remote sensing*.

Palabras clave: Soberanía tecnológica, Inteligencia artificial, *Deep learning*, Datos clasificados, Reentrenamiento.

172 – Generación sintética de defectos en imágenes de placas de acero para aplicaciones de Defensa combinando modelos de visión fundacionales y de difusión latente generativos

Autores: Fernández García, David[1]; Blanco Adán, Carlos Roberto del[1]; Fuertes Coiras, Daniel[1]

Resumen. El acero es uno de los materiales más relevantes en la industria militar debido a su amplio uso en vehículos, armamento, infraestructuras, blindajes y otros equipos. Sin embargo, durante su proceso de fabricación pueden aparecer defectos o anomalías que comprometan sus propiedades, lo que puede dar lugar a fallos o problemas de mayor gravedad al no cumplirse los estándares de calidad exigidos. En este sentido, la detección temprana y preventiva de dichas irregularidades resulta fundamental para mitigar estos riesgos, razón por la que ha adquirido gran relevancia y ha sido objeto de numerosos estudios. Si bien existen métodos manuales para su detección, estos suelen ser lentos y costosos. Por ello, los sistemas basados en inteligencia artificial y aprendizaje profundo representan

[1] Universidad Politécnica de Madrid.

una alternativa prometedora, ya que permiten una detección automática, rápida y eficiente. No obstante, estos sistemas requieren grandes bases de datos anotadas con ejemplos de defectos o anomalías para funcionar correctamente, lo que constituye una limitación importante debido al elevado coste y la dificultad que entraña su generación. Ante esta situación, se propone una estrategia avanzada de IA generativa para crear nuevas muestras de imágenes de entrenamiento con defectos que sean realistas y verosímiles, de modo que permitan entrenar adecuadamente la arquitectura de red neuronal del módulo de detección. En concreto, se plantea la combinación de modelos generativos de difusión latente con modelos fundacionales de visión. El modelo de difusión generativa permite introducir de forma verosímil una amplia gama de defectos en muestras sin defectos, para lo que se modelan de manera independiente la apariencia del defecto, así como su geometría y localización. Con el fin de superar la limitación derivada del reducido número de muestras con defectos, que condiciona la calidad del entrenamiento del modelo de difusión y, por tanto, su capacidad de generación de imágenes, se adopta el modelo fundacional CLIP para la representación semántica de imágenes, reaprovechando su preentrenamiento y su conocimiento a gran escala de conceptos visuales y textuales. Para evaluar la solución propuesta, se ha utilizado la base de datos MVTec AD-2, que incluye imágenes de placas de acero. Además, la calidad de las imágenes generadas se ha evaluado a partir de la mejora en la detección de defectos alcanzada por un sistema de vanguardia basado en *Transformers* y modelos fundacionales de visión, así como mediante su comparación con otros trabajos del estado del arte.

Palabras clave: IA Generativa, Placas de acero, Modelos de difusión, Modelos fundacionales, Detección de defectos.

203 – Sistema autónomo para la interceptación marítima de embarcaciones de alta velocidad con USV mediante *deep reinforcement learning* multiagente

Autores: Moreu Gamazo, José M.[1]; Rodríguez Llorente, Guillermo[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]; Escola, Pol[1]; García Crespo, Ricardo[1]; Liaño Diaz, Manuel[1]

Resumen. La vigilancia e interceptación de embarcaciones que realizan actividades ilícitas constituye uno de los desafíos más complejos de la seguridad marítima. Estas embarcaciones operan a velocidades de hasta 75 nudos, ejecutan maniobras evasivas impredecibles y exigen una inmovilización no letal que preserve la integridad física de agentes y ocupantes, respetando la normativa internacional de navegación (COLREGS). El presente trabajo describe el diseño del módulo PGI (Planificación y Guiado para Interceptación) del sistema SIAD-Mar, IA embarcada del proyecto USVINT (Lote 3, CPP 02/2025). El PGI implementa una arquitectura híbrida de cuatro niveles. El nivel estratégico selecciona objetivos y asigna plataformas USV según el estado de la misión. El nivel táctico emplea un agente de *deep reinforcement learning* entrenado en

[1] HI-Iberia Ingeniería y Proyectos S. L.

simulación para calcular el punto óptimo de interceptación y generar los *waypoints* que maximizan la probabilidad de despliegue efectivo del mecanismo no letal. El nivel reactivo de seguridad aplica verificación formal mediante *control barrier functions* (CBF), imponiendo restricciones de colisión y COLREGS entre planificador y autopiloto ante situaciones no vistas en entrenamiento, mitigando así los riesgos de comportamiento impredecible y fallos en cascada. Finalmente, el nivel de guiado terminal satisface las restricciones de ángulo y distancia relativa requeridas por el mecanismo de inmovilización. Para escenarios de coordinación de enjambre, algoritmos multiagente descentralizados permiten la cooperación táctica de múltiples USV en maniobras de acorralamiento y corte de ruta, con reparto dinámico de tareas y replanificación en tiempo real bajo comunicaciones degradadas o entornos GNSS-denegados. El entrenamiento sigue una estrategia *Sim-to-Real* y el sistema se despliega sobre *hardware* embarcado respetando requisitos estrictos de latencia extremo a extremo. Una capa de IA explicable (XAI) justifica al operador cada recomendación táctica —riesgo estimado y probabilidad de éxito de la maniobra— en cumplimiento del paradigma *human-on-the-loop* requerido en aplicaciones de seguridad y defensa. El trabajo responde a las prioridades de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026): contribuye a los USV de la AIT 6.4.2 con navegación autónoma conforme a COLREG, ayuda a la decisión en tiempo real y cooperación entre plataformas; a los enjambres USV/UUV de la AIT 6.4.3 con toma de decisiones descentralizada y replanificación en tiempo real y al objetivo transversal de aplicación de la IA a defensa aportando garantías formales de seguridad frente a los riesgos de comportamiento impredecible y fallos en cascada (línea 11.5.1).

Palabras clave: *Multi-agent reinforcement learning* (MARL), Planificación autónoma, Vehículos de superficie no tripulados (USV), Inteligencia artificial explicable (XAI).

224 – BELLONA: sistema multiagente con modelos de lenguaje para la generación automatizada de Cursos de Acción militares

Autores: Zaera Mata, Sergio[1]; Gallardo Romero, Galo[1]; Castro Cernadas, Jaime[1]; Queraltó Pereira, Sergio[1]; Redondo Soto, Tamara[1]; García Higueras, Luis[1]; Gómez-Espinosa Martín, Roberto[1]

Resumen. La generación de Cursos de Acción (COA) es una actividad crítica del planeamiento militar que, en los procedimientos actuales, exige tiempo considerable y personal con elevada especialización táctica. En entornos de alta presión temporal —crisis emergentes, operaciones de respuesta rápida— esta dependencia puede comprometer la capacidad de reacción del mando. El proyecto BELLONA aborda esta necesidad mediante un demostrador tecnológico que integra Modelos de Lenguaje (LLM) y una arquitectura multiagente para la generación asistida de COA en misiones militares. Desarrollado en el marco del Programa COINCIDENTE 2024 del Ministerio de Defensa, BELLONA implementa un sistema multiagente de inteligencia artificial con roles complementarios, entre ellos: el agente adversario, que modela el comportamiento del bando contrario; el agente reflexivo, que evalúa y refina iterativamente las propuestas; el superagente, que orquesta la colaboración entre

[1] HI Iberia.

componentes o el agente de seguridad, que verifica la coherencia táctica y la conformidad ética. El conjunto opera sobre modelos de código abierto desplegados *on-premise* mediante contenedores *Docker/Kubernetes*, garantizando la soberanía tecnológica sin dependencia de proveedores cloud extranjeros. El principio de *human-in-the-loop* (HiL) es estructural: el sistema propone, el operador humano revisa, modifica y aprueba. Ninguna recomendación tiene efecto sin validación humana explícita, garantizando el control del mando en todo momento y la conformidad con los marcos éticos y regulatorios de España y la Unión Europea. El demostrador contempla dos modos de operación: adiestramiento, orientado a escuelas militares y centros de instrucción, y operacional, para puestos de mando con integración en la cadena C4I. El sistema se encuentra en fase de prototipo funcional validado en laboratorio que incluye generación de COA sobre escenarios de ejercicio basados en doctrina OTAN desclasificada, visualización en *Common Operational Picture* (COP) y confrontación iterativa entre agentes. Los resultados preliminares demuestran la viabilidad técnica del enfoque y una reducción sustancial del tiempo de elaboración de COA respecto al proceso manual, con salidas validadas cualitativamente por expertos militares colaboradores. BELLONA se alinea con las prioridades de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) en materia de Inteligencia Artificial y soberanía tecnológica. Representa además un ejemplo paradigmático del Programa COINCIDENTE en su 40.º aniversario: tecnología civil de vanguardia —modelos de lenguaje de código abierto— al servicio de la modernización de las capacidades de mando y control nacionales.

Palabras clave: Inteligencia artificial, Cursos de Acción, Sistemas multiagente, Modelos de lenguaje, C4I, Soberanía tecnológica.

244 – TSAS-M: hacia una analítica de próxima generación mediante arquitecturas agénticas y el protocolo MCP

Autor: González, Moisés[1]

Resumen. El incremento exponencial en el volumen de datos generados durante las campañas de ensayos en vuelo (vuelos reales, laboratorios y simulaciones) plantea un desafío crítico para la agilidad en la toma de decisiones en el sector Defensa. Este trabajo presenta la evolución de la plataforma TSAS-M (*Time Series Analytics Studio for Military*) hacia un ecosistema de analítica agéntica, superando el modelo tradicional de análisis pasivo de series temporales. El incremento exponencial en el volumen de datos generados durante las campañas de ensayos en vuelo (vuelos reales, laboratorios y simulaciones) plantea un desafío crítico para la agilidad en la toma de decisiones en el sector Defensa. La innovación principal radica en la integración de una capa de agentes inteligentes capaces de interactuar dinámicamente con fuentes de datos heterogéneas mediante el *Model Context Protocol* (MCP). Esta arquitectura permite a los agentes de IA conectar de forma estandarizada y segura con metadatos críticos alojados en sistemas externos como el control de configuración

[1] Airbus Defence and Space S. A. U.

del avión (A/C PLM), la gestión de ensayos (*Test Management Tool*) y la planificación de test (*Test Planning Tool*). A través de esta convergencia digital en la nube, TSAS-M no solo unifica la información, sino que permite que la IA contextualice automáticamente las anomalías detectadas en las series temporales con el estado real de la configuración de la aeronave. Los resultados preliminares de la fase de Prueba de Concepto (PoC 2024-2025) demuestran una reducción significativa en la latencia del análisis y una mejora en la precisión del etiquetado inteligente. Este avance sienta las bases para la plataforma consolidada de 2028, alineada con los objetivos de soberanía tecnológica y superioridad de información de la industria de defensa española. Este trabajo será expuesto oralmente.

Palabras clave: Inteligencia artificial agéntica, *Model Context Protocol*, Series temporales, Nube de datos, Virtualización, *Cloud*.

49 – Sistemas de tiempo real tolerantes a fallos mediante KAN: del problema de la caja negra a la certificación y gobernanza en proyectos de defensa

Autores: Martínez Heredia, Antonio Manuel[1]; Ortiz, Andrés[2]

Resumen. La tolerancia a fallos en sistemas en tiempo real no es solo un problema técnico: en entornos críticos, si un modelo no puede explicar sus decisiones, no puede validarse, y lo que no se valida no se certifica ni se integra en un sistema con garantías. Esta tensión entre rendimiento e interpretabilidad ha limitado el uso de modelos avanzados en contextos donde el fallo tiene un impacto operativo. Este trabajo presenta un estudio comparativo, publicado en Sensors (MDPI), entre Kolmogorov-Arnold Networks (KAN) y redes neuronales convencionales para la detección de anomalías en señales de sensores. Las KAN hacen explícitas las funciones de activación que aprenden, lo que permite analizar su comportamiento sin perder capacidad predictiva. En los casos evaluados, esa transparencia no supone penalización en el rendimiento. La consecuencia es operativa: cuando el modelo puede auditarse, los procesos de

[1] JCISAT.
[2] Universidad de Málaga.

verificación, validación y certificación dejan de ser un factor limitante. Se reduce la incertidumbre en la evaluación del riesgo y el responsable del programa recupera visibilidad sobre el sistema que adquiere o certifica. El trabajo propone un marco que conecta estas propiedades con la gestión de programas en sectores críticos, como automoción, industria 4.0, sistemas autónomos y defensa, y define en qué condiciones las KAN mejoran a la vez la resiliencia del sistema y la gobernanza del proyecto. El análisis cubre el ciclo de vida completo, desde el diseño y la integración hasta la verificación y la aceptación, con atención a los riesgos técnicos y contractuales asociados a la opacidad de los modelos. Una IA que se explica no es solo una mejora técnica: es una condición para operar con control.

Palabras clave: Tolerancia a fallos, Sistemas en tiempo real, Kolmogorov-Arnold Networks, Interpretabilidad, Gestión de proyectos, Certificación, Ciclo de vida.

Área 12
SOCIEDAD, ECONOMÍA Y HUMANIDADES

12.1
Modelos socioeconómicos / Economía y política industrial

215 – Heterogeneidad competitiva, innovación y autonomía estratégica en la base industrial europea de defensa: evidencia microeconómica para la UE27

Autores: López-Sánchez, José Ignacio[1]; Palomo Zurdo, Ricardo J.[1]; Molina-López, Manuel M.[1]

Resumen. La consolidación de una Base Tecnológica e Industrial de Defensa Europea (EDTIB) más sólida y resiliente se ha convertido en una prioridad estratégica ante el nuevo contexto geopolítico, las vulnerabilidades en las cadenas de suministro y el impulso a la autonomía estratégica europea. Sin embargo, la evidencia empírica a nivel microeconómico sobre la estructura productiva, las capacidades innovadoras y la heterogeneidad competitiva del ecosistema industrial de defensa europeo sigue siendo limitada. Esta comunicación analiza 75 710 empresas de la UE27 identificadas en ORBIS que cumplen criterios económicos mínimos de dimensión empresarial, incorporando de forma adicional evidencia comparada para Reino Unido, Noruega y Turquía. Frente a enfoques centrados en exclusiva en grandes contratistas o empresas con ingresos

[1] CEU San Pablo University.

explícitamente militares, el estudio adopta una aproximación más amplia que permite captar el ecosistema dual de defensa, incluyendo proveedores especializados y empresas con capacidades de uso dual integradas en las cadenas de valor europeas. El trabajo examina cómo el tamaño empresarial, la productividad, el desempeño económico-financiero y los resultados innovadores, aproximados mediante publicaciones y patentes concedidas, vivas o pendientes, configuran distintas posiciones competitivas dentro de la base industrial europea de defensa. La metodología combina análisis descriptivo de distribuciones, técnicas de agrupamiento (*cluster analysis*) y estimaciones econométricas para estudiar relaciones no lineales entre tamaño, productividad e innovación, controlando la heterogeneidad sectorial (NACE Rev.2) y territorial (NUTS2/NUTS3). Sobre esta base, se espera identificar una elevada heterogeneidad en eficiencia productiva e intensidad innovadora entre empresas, así como evidencias de que empresas medianas especializadas pueden desempeñar un papel particularmente relevante en combinar productividad, innovación y resiliencia. Asimismo, se anticipan patrones territoriales y sectoriales de concentración de capacidades con implicaciones para la seguridad de suministro y la autonomía estratégica. La contribución esperada es doble. Desde una perspectiva académica, el trabajo amplía la literatura en economía de la defensa aportando nueva evidencia microeconómica sobre heterogeneidad empresarial e innovación en industrias reguladas de uso dual. Desde una perspectiva aplicada, ofrece resultados relevantes para la política industrial de defensa, el diseño de capacidades y el fortalecimiento de la EDTIB, contribuyendo a debates plenamente alineados con los objetivos del Congreso Nacional DESEi+d 2026.

Palabras clave: *Defence industry*, *Productivity*, *Firm size*, *Regulation*, *Competitiveness*.

12.2
Instrucción y educación

212 – Entropía bélica y fricción y clausewitziana: un modelo cuantitativo para medir el poder militar en entornos de información

Autores: Conte de los Ríos, Augusto[1]; García Peláez, Javier[2]; Madariaga Domínguez, Ernesto[3]

Resumen. La transición de la entropía termodinámica a la entropía informativa permite cuantificar lo que Clausewitz denominó el «clima de guerra»: la fricción que satura y degrada las decisiones de mando cuando el flujo de datos supera la capacidad de procesamiento. A diferencia de trabajos previos sobre la gestión del orden y el caos mediante redes de información, este artículo aborda la sintaxis granular de esa fricción en entornos donde la simetría informativa entre contendientes es casi perfecta, dada la facilidad actual de acceder a inteligencia de fuentes abiertas o recibirla como proxy. Apoyándose en la tesis de Barry Watts sobre la fricción como propiedad estructural inevitable de los sistemas complejos en combate, se argumenta que el actor débil puede emplear tácticas de alta entropía, dispersión, imprevisibilidad, saturación cognitiva, para agotar al

[1] Armada española.
[2] Navantia.
[3] Universidad de Cantabria (Escuela Técnica Superior de Náutica).

adversario en el dominio del tiempo, provocando errores de interpretación táctica y estratégica de efecto acumulativo. La fricción deja así de ser un accidente operativo y se convierte en un instrumento de guerra deliberado. La aportación central del trabajo es doble. La complejidad de Kolmogorov se utiliza como medida inversa de la eficiencia del mando: la resiliencia estratégica crece cuanto más simple y robusto es el plan operativo, reduciendo su vulnerabilidad a la degradación. La distancia de Bhattacharyya cuantifica la divergencia entre la conciencia situacional percibida por cada bando y la realidad objetiva del campo de batalla, evaluando la brecha que determina el rendimiento operativo de fuerzas propias y adversarias ponderado por su respectiva complejidad de mando. El modelo resultante ofrece una base matemática para anticipar el colapso sistémico en escenarios de guerra cuasisimétrica, reivindicando la centralidad de las capacidades cinéticas y los despliegues operativos masivos como variables determinantes del resultado bélico. Son precisamente estas dimensiones las que la literatura especializada ha ido relegando de forma progresiva frente al paradigma de los efectores electrónicos y la guerra en red, una tendencia que este trabajo cuestiona explícitamente.

Palabras clave: Entropía bélica, Fricción clausewitziana, Complejidad de Kolmogorov, Distancia de Bhattacharyya, Guerra algorítmica, Poder militar cuantitativo, Conciencia situacional.

12.3
Geografía, política y derecho

18 – La cultura de defensa ante los nuevos retos de la inteligencia artificial

Autoras: Martínez Martínez, Dolores Fuensanta[1]; Pérez Cárceles, María Concepción[1]; Fernández Valera, María Magdalena[1]; Nicolás Martínez, Catalina[1]

Resumen. El fomento y la promoción de la cultura de defensa, definida por el Ministerio de Defensa en los años noventa como el grado de conocimiento que la ciudadanía posee sobre los asuntos de defensa, así como la imagen que tiene de las Fuerzas Armadas y de sus integrantes, puede considerarse un relevante factor de cohesión social, en particular en lo relativo a las relaciones civiles-militares. Asimismo, la conciencia en materia de seguridad y defensa no constituye únicamente un impulso para la innovación y el desarrollo tecnológico, sino que actúa también como un elemento de desarrollo socioeconómico y cultural. En este sentido, la cultura de defensa se configura como un instrumento clave para el desarrollo integral de las sociedades contemporáneas. Los centros universitarios de la Defensa, como instituciones específicas de educación superior e investigación, representan el primer eslabón y un elemento catalizador fundamental en la cohesión entre la sociedad civil y la militar. Estos centros están llamados a convertirse en sedes naturales para la investigación,

[1] Centro Universitario de la Defensa, Academia General del Aire (San Javier), Murcia.

la innovación y el desarrollo tecnológico en el ámbito de la defensa nacional en España. El objeto del presente trabajo, desarrollado en el CUD San Javier – AGA, es analizar y evaluar los factores y constructos necesarios para la elaboración de un índice nacional de cultura de defensa, así como examinar el posible impacto de la inteligencia artificial en la generación, evolución y proyección futura.

Palabras clave: Cultura de defensa, Índice nacional, Inteligencia artificial, Desarrollo, Cohesión social.

117 – La siguiente frontera geopolítica: el espacio

Autor: Corraliza Ochovo, Rubén[1]

Resumen. La presente situación política global está provocando una sacudida a las organizaciones y tratados internacionales. Desde países cortando el paso en estrechos naturales —como Ormuz—, hasta la anexión unilateral de territorios soberanos mediante una invasión –como el Dombás–. En este clima de incertidumbre e inestabilidad, en el que entidades y acuerdos que buscan mantener el orden se ven superados, parece conveniente dirigir nuestra mirada a la siguiente frontera de conflictos: el espacio. Actualmente, las relaciones internacionales en este asunto están mediadas a través del Tratado de las Naciones Unidas sobre el Espacio Ultraterrestre. En los artículos que componen dicho acuerdo, se especifica el marco mediante el que se regulan las actividades humanas fuera de la Tierra. Por tanto, la metodología que plantea esta investigación consiste en realizar un análisis de riesgos y vulnerabilidades de este y otros documentos relativos a la legislación espacial. De tal forma que, una vez recogidas las debilidades del tratado, se plantearán escenarios indeseables y contramedidas para dichos escenarios. Algunos ejemplos de estos supuestos serían: una hipotética accidental cascada de basura

[1] Consultant.

espacial que afectase a los satélites gubernamentales –fruto del síndrome de Kessler–, el asentamiento de bases permanentes en la Luna y la minería de asteroides. El punto de partida de esta especulación sería el Tratado Antártico, dado que es un territorio que goza de un estatus similar. De ese modo, se lograría aunar una estrategia política para que España, y por extensión la Unión Europea, estuviesen preparadas ante las tensiones políticas, derivadas del espacio, que puedan sobrevenir. Esta prevención parece de especial utilidad a día de hoy, ya que el sistema que nos ampara ha demostrado, una vez tras otra, debilidad ante los envites de conflictos —que ni siquiera suceden en nuestro territorio–. Por consiguiente, un estudio como el que aquí se presenta lograría mitigar los futuros daños producidos mediante una debida preparación. Esto nos lleva a los resultados que deberá producir el proyecto. Entre ellos se encuentran el ya mencionado análisis de vulnerabilidades de la legislación vigente sobre el espacio y la colección de escenarios supuestos que podrían suceder. Asimismo, el trabajo generaría una serie de medidas preventivas que traten de paliar las fricciones internacionales que el espacio pueda originar. Para terminar, sentaría las bases de un posible plan de ruta que puedan implementar tanto España como la Unión Europea a fin de aplicar estas medidas.

Palabras clave: Geopolítica, Prevención, Espacio, Estrategia, Tratado.





PUBLICACIONES DE DEFENSA

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE DEFENSA
SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES Y PATRIMONIO CULTURAL