	FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA	CÓDIGO:	DE-DEAJU-FR-047
	FORMATO INFORME DE SUPERVISIÓN BIENES Y SERVICIOS EN GENERAL - CONTRATOS, CONVENIOS U ÓRDENES DE COMPRA	VERSIÓN No.	02
		VIGENCIA:	08-09-2026

1. DATOS GENERALES DEL CONTRATO O CONVENIO

Unidad y/o Dependencia	ESUFA – GRUAC - ESINV
Fecha del informe	Día: 05 Mes: 11 Año: 2026
Tipo de informe	Parcial: X Final:
Periodo evaluado	Mes: 10 Año: 2026
Número de Contrato	005-06-K-ESUFA-GRUAC-2026
Contratista	JUAN DAVID PAVA
Objeto	LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS PROFESIONALES Y DE APOYO A LA GESTIÓN DE UN PERSONAL PARA EL GRUPO ACADÉMICO DE LA ESCUELA DE SUBOFICIALES FAC CT. ANDRES M DIAZ, LOTE 06 COINVESTIGADOR
Valor del Contrato	$ 56.072.800
Fecha Suscripción	Dia: 29 Mes: 01 Año: 2026
Plazo de Ejecución	Dia: 10 Mes: 12 Año: 2026
Forma de Pago	LA NACIÓN - MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL - FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA pagará al contratista el valor adjudicado del contrato, de la manera en que se indica a continuación: CINCUENTA Y SEIS MILLONES SETENTA Y SETENTA Y DOS MIL OCHOCIENTOS PESOS M/CTE ($ 56.072.800):

No. PAGOS	CORTE ENTREGA DOCUMENTOS DE PAGO	VALOR	PAC
1	06 DE MARZO DE 2026	$ 5.533.500	MARZO 2026
2	06 DE ABRIL DE 2026	$ 5.533.500	ABRIL 2026
3	06 DE MAYO DE 2026	$ 5.533.500	MAYO 2026
4	06 DE JUNIO DE 2026	$ 5.533.500	JUNIO 2026
5	06 DE JULIO DE 2026	$ 5.533.500	JULIO 2026
6	06 DE AGOSTO DE 2026	$ 5.533.500	AGOSTO 2026
7	06 DE SEPTIEMBRE DE 2026	$ 5.533.500	SEPTIEMBRE 2026
8	06 DE OCTUBRE DE 2026	$ 5.533.500	OCTUBRE 2026
9	06 DE NOVIEMBRE DE 2026	$ 5.533.500	Noviembre de 2026 /Diciembre de 2026 y/o cuentas por pagar constituidas dentro del primer trimestre de la vigencia 2027 de acuerdo con disponibilidad PAC
10	10 DE DICIEMBRE 2026	$6.271.300	Diciembre de 2026 y/o cuentas por pagar constituidas dentro del primer trimestre de la vigencia 2027 de acuerdo con disponibilidad PAC

2. CUMPLIMIENTO CONDICIONES INICIO EJECUCIÓN CONTRATO O CONVENIO

Registro Presupuestal	No.: 3626 Dia: 05 Mes: 02 Año: 2026
Oficio Aprobación Vigencias Futuras (si aplica)	No.: N/A Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Registro Presupuestal VF	No.: N/A Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Aprobación Garantía de Cumplimiento	Dia: 06 Mes: 02 Año: 2026
Aprobación Garantía Responsabilidad Civil Extracontractual	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A

Aprobación - Otras Garantías (Póliza Aeronáutica, Póliza de Transporte)	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Acta de Inicio de Ejecución (si aplica)	Dia: 06 Mes: 02 Año: 2026

3. MODIFICATORIOS / SUSPENSIONES

PRIMER MODIFICATORIO	
Fecha firma Modificatorio	Dia: 06 Mes: 02 Año: 2026
Objeto de la Modificación	Se realiza modificatorio 01 al contrato, con el fin de cambiar plazo de ejecución y forma de pago, en atención a las razones expuestas en el documento modificatorio, y el objeto del contrato sigue siendo la prestación de Servicios Profesionales y de apoyo a la gestión de un personal para el grupo académico de la escuela de suboficiales FAC CT. ANDRES M DIAZ, LOTE 06 COINVESTIGADOR, El presente Contrato está sujeto a registro presupuestal y el pago de su valor a las siguientes apropiaciones presupuestales.

CÓDIGO RECURSO	RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD MEDIDA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO
R-10	A-02-02-02-008-003-09	SERVICIOS PROFESIONALES, CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS (EXCEPTO LOS SERVICIOS DE INVESTIGACION, URBANISMO, JURÍDICOS Y DE CONTABILIDAD)	Unidad	1	$ 56.072.800

Valor Adicionado / reducción (Si aplica)	N/A
Nuevo Valor Contrato	N/A
Nuevo Plazo ejecución (Si aplica)	Dia: 04 Mes: 12 Año: 2026
Registro Presupuestal Ajustado	No.: 3626 Dia: 05 Mes: 02 Año: 2026
Aprobación Garantía Cumplimiento Modificatorio (si aplica)	Dia: 06 Mes: 02 Año: 2026
Aprobatorio Garantía RCE Modificatorio (si aplica)	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Aprobación - Otras Garantías	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
SEGUNDO MODIFICATORIO	
Fecha firma Modificatorio	Dia: 17 Mes: 06 Año: 2026
Objeto de la Modificación	Se realiza modificatorio 02 al contrato, con el fin de forma de pago, en atención a las razones expuestas en el documento modificatorio, y el objeto del contrato sigue siendo la prestación de Servicios Profesionales y de apoyo a la gestión de un personal para el grupo académico de la escuela de suboficiales FAC CT. ANDRES M DIAZ, LOTE 06 COINVESTIGADOR, El presente contrato queda sujeto a la siguiente línea de pago:

	<table><tr><th>No. Pago</th><th>Fecha de corte</th><th>PAC Actual</th><th>PAC Propuesto</th></tr><tr><td>1</td><td>06 julio 2026</td><td>Julio 2026</td><td>Agosto 2026</td></tr><tr><td>2</td><td>06 agosto 2026</td><td>Agosto 2026</td><td>Septiembre 2026</td></tr><tr><td>3</td><td>06 septiembre 2026</td><td>Septiembre 2026</td><td>Octubre 2026</td></tr><tr><td>4</td><td>06 octubre 2026</td><td>Octubre 2026</td><td>Noviembre 2026</td></tr><tr><td>5</td><td>06 noviembre 2026</td><td>Noviembre/Diciembre 2026</td><td>Diciembre 2026 o Cuentas por pagar</td></tr><tr><td>6</td><td>10 diciembre 2026</td><td>Diciembre 2026 o primer trimestre de 2027</td><td>Diciembre 2026 o Cuentas por pagar</td></tr></table>
Valor Adicionado / reducción (Si aplica)	N/A
Nuevo Valor Contrato	N/A
Nuevo Plazo ejecución (Si aplica)	N/A
Registro Presupuestal Ajustado	No.: 3626 Dia: 05 Mes: 02 Año: 2026
Aprobación Garantía Cumplimiento Modificatorio (si aplica)	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Aprobatorio Garantía RCE Modificatorio (si aplica)	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Aprobación - Otras Garantías	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A

PRIMERA SUSPENSIÓN	
Fecha firma	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Objeto de la Suspensión	NO APLICA
Reinicio	Dia: N/A Mes: N/A Año: N/A
Observaciones	NO APLICA

4. PERSONAL REQUERIDO PARA LA EJECUCIÓN DEL CONTRATO O CONVENIO (EXIGIDO EN LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS)

NOMBRES Y APELLIDOS	CARGO	OTROS (TARJETA PROFESIONAL/TÍTULO PROFESIONAL O TÉCNICO)
N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A

5. ESTADO DE EJECUCIÓN (PLAZO VS CUMPLIMIENTO)

Avance Físico	87 %
Avance en Tiempo	87 %
Estado del Contrato/Convenio	En ejecución: X Ejecutado: Suspendido:
Cumplimiento general	Sí No X

6. ESTADO FINANCIERO

Valor del Contrato	$ 56.072.800
Valor y Porcentaje de Pagos realizados	$ 38.734.500 (69.08 %)
Valor y Porcentaje de Pagos pendientes de realizar	$ 17.338.300 (30.92 %)

Pago No.	Fecha Acta Recibo a Satisfacción	No Factura y Fecha	Valor Tramitado	No Orden de Pago y fecha	Valor Pagado	No. soporte y fecha (SAP)
1	06-marzo-2026	Cuenta de cobro No.001 (06/03/2026)	$ 5.533.500	126204726 (16-04-2026)	$ 5.533.500	5003865205 (18-03-2026)
2	06-abril-2026	Cuenta de cobro No. 002 (06/04/2026)	$ 5.533.500	83943726 (19-03-2026)	$ 5.533.500	5003881397 (15-04-2026)
3	06-mayo-2026	Cuenta de cobro No. 003 (06/05/2026)	$ 5.533.500	178122226 (20-05-2026)	$ 5.533.500	5003913199 (20-05-2026)
4	06-junio-2026	Cuenta de cobro No. 004 (06/06/2026)	$ 5.533.500	228828726 (19-06-2026)	$ 5.533.500	5003935665 (17-06-2026)
5	06-julio-2026	Cuenta de cobro No. 005 (06/07/2026)	$ 5.533.500	303337626 (04-08-2026)	$ 5.533.500	5003957170 (21-07-2026)
6	06-agosto-2026	Cuenta de cobro No. 006 (06/08/2026)	$ 5.533.500	352453526 (02-09-2026)	$ 5.533.500	5003980476 (21-08-2026)
7	06-septiembre-2026	Cuenta de cobro No. 007 (06/09/2026)	$ 5.533.500	404708526 (02-10-2026)	$ 5.533.500	5003996731 (15-09-2026)
				Total Pagos	$ 38.734.500	N/A

ANEXOS SOPORTES DEL PAGO O PAGOS REALIZADOS DENTRO DEL PERIODO ANALIZADO EN EL PRESENTE INFORME DE SUPERVISIÓN (SOPORTES DE LA FACTURACIÓN).

SIIF Nación

Orden de pago Presupuestal de gastos
Comprobante

Usuario Solicitante: MHachavezo Alexandra Chavez Oviedo
Unidad ó Subunidad Ejecutora Solicitante: 15-01-05-012 FAC ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA
Fecha y Hora Sistema: 2026-10-13-2:59 p. m.

ORDEN DE PAGO PRESUPUESTAL

Número:	404708526	Fecha Registro:	2026-10-02	Unidad / Subunidad ejecutora:	15-01-05-012 FAC ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA				
Vigencia Presupuestal	Actual	Estado:	Pagada	Nro Obligación:	104426	Comprobante Contable de la Generación:			
Fecha Máxima Pago:	2026-10-06	Código de Referencia:	04500072900404708526	Tipo de Moneda:	COP-Pesos	Tasa de Cambio:	0,00		
Valor Bruto:	5.533.500,00	Valor Deducciones:	55.335,00	Valor Neto:	5.478.165,00	Saldo x Pagar:	0,00		

VALORES PAGADOS

TRM Pago		Valor Bruto	5.533.500,00	Valor Deducciones	55.335,00	Valor Neto	5.478.165,00	Moneda Base Compra	Valor MBC

REINTEGROS

Números				No Recaudo:	
Bruto Reintegrado Pesos:	0,00	Reintegrado Deducciones Pesos:	0,00	Reintegrado Neto Pesos:	0,00
Bruto Reintegrado Moneda:	0,00	Reintegrado Deducciones Moneda:	0,00	Reintegrado Neto Moneda:	0,00

TERCERO DE LA ORDEN DE PAGO

Identificación:	80429336	Razón Social:	JUAN DAVID PAVA	Medio de Pago:	Abono en cuenta

CUENTA BANCARIA

Número:	38305248018	Banco:	BANCOLOMBIA S.A.	Tipo:	Ahorro	Estado:	Activa

TESORERIA	DOCUMENTO SOPORTE				
13-01-01-DT - DIRECCION TESORO NACION DGCPTN	Número:	CUENTA DE COBRO N. 007	Tipo:	CUENTA DE COBRO	Fecha: 2026-10-02

Tipo Beneficiario Pago 01 - Beneficiario final

ITEM PARA AFECTACION DE GASTOS

DEPENDENCIA / POSICION CATALOGO DE GASTO	FUENTE	REC	SIT	VALOR		VALOR PAGADO	VALOR REINTEGRADO		USO DE PROYECTOS ESPECIALES			
				PESOS	MONEDA	PESOS	PESOS	MONEDA EXTRANJERA	USO DE PROYECTO	MONEDA	TASA DE CAMBIO	VALOR MONEDA
012 ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA / A-02-02-02-008-003 SERVICIOS PROFESIONALES, CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS (EXCEPTO LOS SERVICIOS DE INVESTIGACION, URBANISMO, JURÍDICOS Y DE CONTABILIDAD)												
	Nación	10	CSF	5.533.500,00	0,00	5.533.500,00				Pesos	0,00	0,00

DEDUCCIONES

POSICIONES DEL CATALOGO PARA PAGO NO PRESUPUESTALES		TERCERO		TARIFA	VALOR	VALOR AJUSTADO PAGO	VALOR REINTEGRADO
2-01-05-01-97	RETE-ICA-OTRAS CIUDADES-SERVICIOS	899999325	MUNICIPIO DE MADRID	1,000 %	55.335,00	55.335,00	

LINEAS DE PAGO VINCULADA

DEPENDENCIA PARA AFECTACION DE PAC	POSICION DEL CATALOGO DE PAC	FECHA	VALOR	ATRIBUTO LINEA DE PAGO	ESTADO
012 - ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA	1-2 - ANC - GASTOS GENERALES NACION CSF	2026-10-06	5.533.500,00	40 BIENES, SERVICIOS, IMPUESTOS Y TRANSFERENCIAS CAUSADOS	Pagada

Página 1 de 1

T1. ALEXANDRA CHAVEZ OVIEDO
TECNICO ESPECIALISTA EN TESORERIA

7. CUMPLIMIENTO CONTRACTUAL (Contratista / Entidad)

Objeto contractual	Cumple: X No cumple: No aplica:
Cronograma (Adjuntar)	Cumple: No cumple: No aplica: X
Especificaciones técnicas	Cumple: X No cumple: No aplica:
Pólizas vigentes y aprobadas en la Plataforma SECOP II	Cumple: X No cumple: No aplica:
Obligaciones contractuales generales y especificas	Cumple: X No cumple: No aplica:
Clausula Catalogación	Cumple: No cumple: No aplica: X
Clausula Offset	Cumple: No cumple: No aplica: X
Cargue facturas en Plataforma SECOP II	Cumple: X No cumple: No aplica:
Otras obligaciones de ejecución (ponderables, entregables etc.).	Cumple: X No cumple: No aplica:
Acta de Liquidación o Constancia de No Liquidación	Cumple: No cumple: No aplica: X
Otros	No Aplica

7.1.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS E INFORME DE TRABAJOS REALIZADOS POR EL CONTRATISTA DENTRO DEL PERIODO ANALIZADO EN EL PRESENTE INFORME DE SUPERVISIÓN

INFORME SOBRE EL DESARROLLO Y CUMPLIMIENTO DE LAS ACTIVIDADES CONVENIDAS

OBLIGACIONES CONVENIDAS	CUMPLIMIENTO	OBSERVACIONES DEL SUPERVISOR
1. Revisión y consolidación de información para diagnóstico preliminar de los posibles proyectos de investigación aplicada a formular.	**Cumple**	Se evidencia la verificación periódica de la matriz de seguimiento a investigadores, organizada por tipología de productos para el segundo semestre de 2026. Se destaca la actualización y consolidación de la información del personal docente e investigador.
2. Formulación de convocatoria interna proyectos de investigación ESUFA 2026.	**Cumple**	Se evidencia avance en la planeación estratégica de la investigación mediante la elaboración del Plan de Trabajo Cuatrienal 2027–2031.
3. Seguimiento y control de los proyectos de investigación.	**Cumple**	Se evidencia el desarrollo de actividades orientadas a la planeación y fortalecimiento de las capacidades investigativas de la ESUFA, especialmente mediante la estructuración de macroproyectos y mecanismos de seguimiento, evaluación y control para el periodo 2027–2031.
4. Seguimiento plataforma CvLAC investigadores.	**Cumple**	Se aporta información consolidada sobre la producción de los investigadores por tipología y vigencia.
5. Seguimiento y control productos personal investigadores ESUFA.	**Cumple**	Se evidencia la revisión de la matriz de productos de investigación, con información correspondiente a las vigencias 2024, 2025 y 2026. Esta actividad contribuye al control de la producción académica y científica de los grupos de investigación de la Escuela.
6. Asesoramiento o capacitación personal docente investigador ESUFA.	**Cumple**	Se evidencia la elaboración y presentación de la conferencia “Probar para innovar: del combustible fósil a los biocombustibles”, en el marco de Spaceweek Uniandes, como aporte a la divulgación y transferencia de conocimiento especializado.
7. Planeación y control movilidad docente académica investigativa.	**Cumple**	Se evidencia la participación y articulación académica con la Universidad de los Andes mediante la

		conferencia desarrollada en Spaceweek.
8. Actualización producción investigativa ESUFA	**Cumple**	Se evidencia la consolidación de información sobre los productos de investigación de los grupos y del personal investigador de la ESUFA, permitiendo contar con información organizada para el seguimiento de los resultados de investigación.
9. Formulación y estructuración de proyectos de investigación aplicables a grupos o semilleros de investigación de ESUFA.	**Cumple**	Se destaca la elaboración del Plan de Trabajo Cuatrienal del Escuadrón de Investigación 2027–2031, que contempla objetivos, diagnóstico de capacidades, macroproyectos, metas, indicadores, programación presupuestal y mecanismos de seguimiento. Este documento constituye un aporte importante para la planeación y proyección de la investigación institucional.
10. Evaluación y jurado trabajos de grado.	**Cumple**	Se evidencia el apoyo en la evaluación de trabajos y pósteres durante la Semana del Tecnólogo de la ESUFA, contribuyendo al fortalecimiento de los procesos académicos y de investigación formativa.
11. Apoyar en la consolidación de información y documentación requerida para procesos de renovación de registros calificados y acreditación.	**Cumple**	El Plan de Trabajo Cuatrienal incorpora mecanismos de seguimiento a indicadores de gestión, producción e impacto en ciencia, tecnología e innovación, así como la generación de evidencias para respaldar los procesos de autoevaluación y acreditación institucional y de programas.
12. Participación o asistencia en mínimo un evento académico local, nacional o internacional.	**Cumple**	Se evidencia la participación en Spaceweek Uniandes, la coordinación del soporte logístico y académico durante la Semana del Tecnólogo y el apoyo en la organización y presentación del podcast “Más allá del Uniforme”, actividades que contribuyen a la divulgación del conocimiento y al posicionamiento institucional.

Se anexa informe del contratista completo.

7.1.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE TRABAJOS PENDIENTES Y OBSERVACIONES

ITEM	ACTIVIDAD	ENTREGABLE	PERIODO
3	Seguimiento y control de los proyectos de investigación	Informe avances GH-JEAES-FR-373	MENSUAL
4	Seguimiento plataforma CvLAC Investigadores.	Evidencias actualización enlace currículo Cvlac	MENSUAL
5	Seguimiento y control productos personal investigadores ESUFA	Matriz de control y seguimiento	MENSUAL
6	Asesoramiento o capacitación personal docente investigador ESUFA.	Listados asistencia anexos temas asesoría / capacitación	BIMENSUAL
7	Planeación y control movilidad docente académica investigativa	Evidencias de gestión, planeación y control movilidad	TRIMESTRAL
8	Actualización producción investigativa ESUFA	Actualización base de datos de acuerdo con tipología productos Minciencias	TRIMESTRAL
9	Formulación y estructuración de proyectos de investigación aplicables a grupos o semilleros de investigación de ESUFA.	Formulación en formato GH-JEAES. - FR-296 o equivalente términos de referencia MINCIENCIAS, Formato presupuestal GH-JEAES. -FR-298 o equivalente de presupuesto	CADA VEZ QUE SEA REQUERIDO
10	Evaluación y jurado trabajos grado	Formatos de Evaluación y sustentación Trabajos de Grado	CADA VEZ QUE SEA REQUERIDO
11	Apoyar en la consolidación de la información y documentación requerida, para los procesos de renovación de registros calificados y acreditación del factor de investigación aplicada (Científica), de los programas académicos de ESUFA	Evidencias información solicitada	CADA VEZ QUE SEA REQUERIDO

12	Participación o asistencia, u organización, en mínimo un evento académico de manera presencial o virtual a nivel local, nacional o internacional (foros, congresos, seminarios, entre otros)	Certificado participación	CADA VEZ QUE SEA REQUERIDO

8. INCUMPLIMIENTOS / NOVEDADES (Contratista / Entidad)

Contratista	Sí: ____ No: __X__
Entidad	Sí: ____ No: __X__

Observaciones: N/A

9. SEGUIMIENTO A RIESGOS (MATRIZ)

¿Riesgos materializados?	Sí: No: X
¿Posible materialización de riesgos?	Sí: No: X

Observaciones: No Aplica

10. CONCLUSIÓN EJECUTIVA

En mi calidad de supervisor, una vez revisado el informe de actividades correspondiente al periodo evaluado y sus respectivos soportes, se evidencia un cumplimiento satisfactorio de las obligaciones contractuales, destacándose el seguimiento y consolidación de la información de los investigadores y sus productos, el apoyo a los procesos de investigación, la estructuración del Plan de Trabajo Cuatrienal 2027-2031, así como la participación y apoyo en actividades académicas y de divulgación científica, entre ellas la Semana del Tecnólogo y el evento Spaceweek de la Universidad de los Andes.

11. FIRMA (S)

Nombre del Supervisor	ST. LOPEZ DUQUE NICOLE Principal	**C.C.** 1000572170
Acto Administrativo Nombramiento	Resolución No. 001 del 16 de enero de 2026	
Acta entrega fecha	N/A	
Tipo Novedad	N/A	
Dependencia:	GRUPO ACADEMICO / SECAL	
Firma		

9 INFORME ACTIVIDADES CONTRATO 005-06-K-ESUFA-GRUAC-2026

Madrid, Cundinamarca

30 octubre de 2026.

Con toda atención me permito informar a la Señorita Subteniente Nicole Daniela López supervisor contrato 005-06-K-ESUFA-GRUAC-2026, el desarrollo de actividades al 30 de octubre de 2026:

1. Verificación periódica Matriz de control seguimiento personal de investigadores de la ESUFA por tipología de productos, para el segundo semestre de 2026, del personal docente e investigador ESUFA (Anexo 1).

2. Elaboración presentación para conferencia en la semana Spaceweek Uniandes “Probar para innovar: Del combustible fósil a los Biocombustibles” . (Anexo 2).

3. Se realizo conferencia en el evento Launch dentro de la semana Spaceweek de la Universidad de los Andes





4. Coordinación en el soporte logístico durante la preparación, desarrollo y ejecución de la semana del Tecnólogo, de ESUFA, así como apoyo en la evaluación de trabajos y posters.



5. Apoyo organización y presentación podcast más allá del Uniforme, TJ Álvaro Hernando Meléndez Quintero enlace:

   https://www.youtube.com/watch?v=3sW6Q8f9dhY

Atentamente.

Juan David Pava

Juan David Pava
Contratista
CC 80.429.336

ANEXO 1

GRUPO INV	GRADO	INVESTIGADOR	AÑO	PRODUCTOS									
				Circulación de conocimiento especializado	Demas tipos de Producción Bibliográfica	Desarrollo Tecnologico	Formación Recurso Humano	Producción Bibliográfica resultado de Investigación	Proyectos de Investigación y Desarrollo	Apropiación social Conocimiento	Desarrollo Tecnologico	Consolidado	TOTAL
GICMA	OD18	VICTOR MIGUEL QUINTERO P	2024	7	2	1	11	2				23	
			2025	17			13	2	1	1	2	36	**70**
			2026	6				2	3			11	
GICMA	OD15	ELIANA GERALDINE GOMEZ	2024	1	1		2					4	
			2025	4				1	1			6	**14**
			2026	2				1	1	0		4	
GIEA	OD15	IVAN GUSTAVO PEÑA	2024	2	1			1	1			5	
			2025	3				1				4	**11**
			2026	2								2	
GIEA	OD13	LUIS ARIZA ARIZA	2024				2					2	**5**
			2025	2					1			3	
GICMA	OD15	ORO DE OFIR GARCIA	2024				8					8	
			2025				5					5	**16**
			2026	1				1	1			3	
GIEA	OD15	RENSO MARDU MOLANO	2024	3				1				4	**4**
GIEA	OD16	MAGDA MARISOL ROMERO	2026					1	1			2	**2**
GIEA	OD15	VICTOR CASTAÑEDA	2026	2					1			3	**3**
GIEA	OD15	DANIEL ARTEAGA	2026						1			1	**1**
GIEA	CTO	JUAN D PAVA	2024	1				1					**2**
			2025	2									**2**
			2026	1					2	0			**3**
GICMA	CTO	DIANA VELASCO	2025				12	1					**13**
N/A	OD18	ALEJANDRO SEGURA	2025					1	1			2	**2**
N/A	OD15	ANNIE KORALY RAMIREZ	2026					1	1			2	**2**
N/A	ST	SANTIAGO QUINTERO M	2026					1	1			2	**2**
TOTAL													**152**

ANEXO 2

LAUNCH! · SPACEWEEK UNIANDES

Probar para innovar: Del combustible fósil a los Biocombustibles

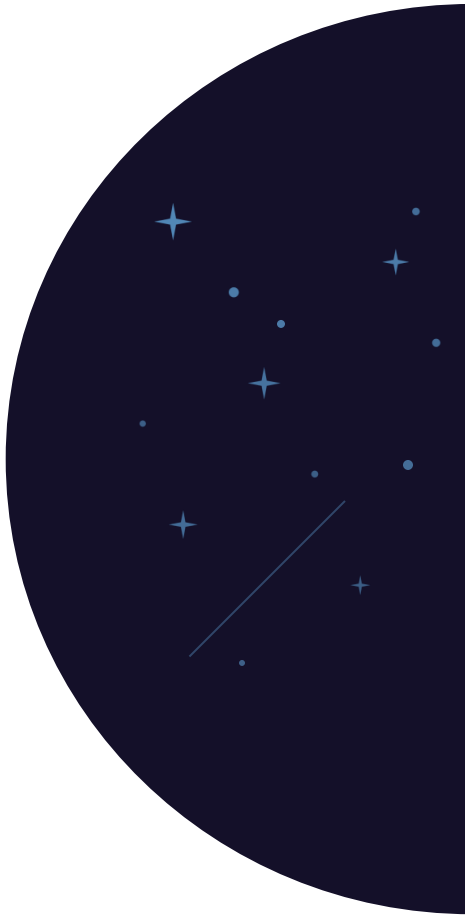
Evaluación técnica y desempeño en turbinas de gas

Juan David Pava

Investigador-Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea Colombiana-ESUFA

ESTRUCTURA MAGISTRAL CONSOLIDADA (60 MINUTOS · 32 DIAPOSITIVAS)

Lo que vamos a ver



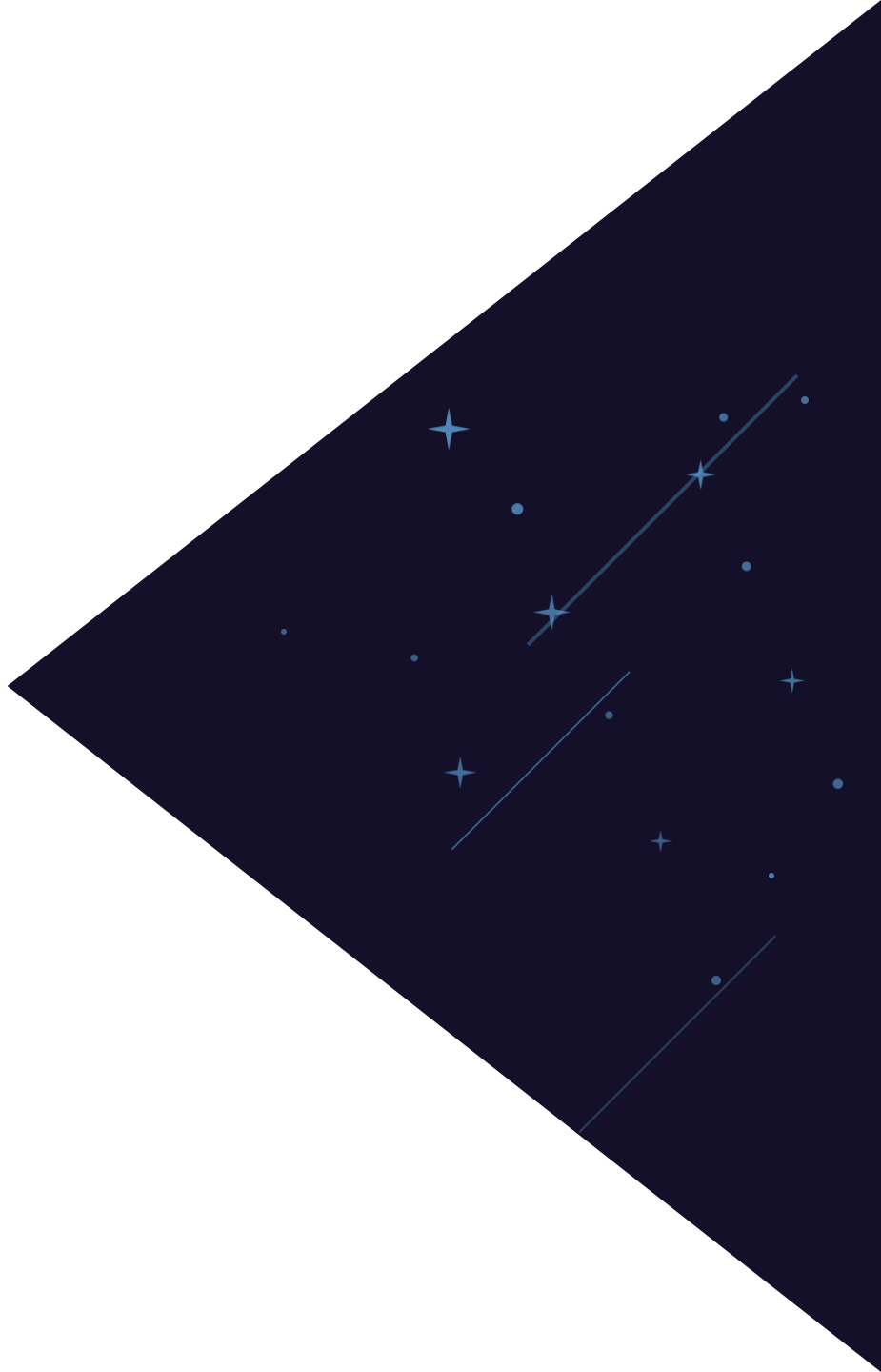
01	Antecedentes: De la SGM (Whittle/Jumo 004) al SR-71, XB-70 y Concorde
02	Aviación moderna y dinámica de grandes volúmenes
03	Combustión, Vibraciones y Metalurgia
04	Laboratorio vivo Bancos de Prueba y Motores

«En una turbina de gas, el combustible no es solo energía: es un componente mecánico líquido, un refrigerante térmico, un lastre estructural y un agente químico que dicta la supervivencia del motor.»

TESIS CENTRAL · COEVOLUCIÓN COMBUSTIBLE-MATERIAL EN TURBOMÁQUINAS (LEFEBVRE & BALLAL, 2010)

SECCIÓN 01 · Antecedentes

Cuando el combustible define el límite mecánico



1939–1945: El nacimiento del turborreactor y la crisis de la llama

ESCUELA BRITÁNICA (Whittle W.1 / Rolls-Royce Derwent): Gloster Meteor	ESCUELA ALEMANA (Von Ohain / Junkers Jumo 004B): ME-262
Selección de keroseno iluminante parafínico buscando estabilidad de llama y lubricidad hidrodinámica en bombas.	Escasez crítica de petróleo obligó a emplear J-2 (destilado sintético de lignito/carbón) y diésel K-1.
Reto mecánico: cámaras individuales (can-type) con alta caída de presión y asimetría térmica.	Falla termomecánica: alta viscosidad y residuos aromáticos causaban coquización severa en los 6 inyectores.
Ventaja aliada: acceso a crudos ligeros para sostener la metalurgia Nimonic 80 (base níquel-cromo). TBO 150 horas	Puntos calientes + ausencia de níquel/cobalto (álabes huecos Tinidur) redujeron el TBO a solo ~25 horas.

Referencias: Meher-Homji, C. B. (1997). "Anselm Franz and the Jumo 004", ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 119(4); Giffard, H. (2016). Making Jet Engines in World War II.

ESPECIFICACIONES MILITARES (1944–1955)

De las mezclas gasolina-keroseno (JP-1 a JP-4) al Jet A-1

- JP-1 (1944): Keroseno puro (-60 °C congelación), pero bajo rendimiento de refinería (<5% por barril).
- JP-2 / JP-3: Cortes amplios (wide-cut); presión de vapor Reid (5–7 psi) generaba ebullición (boil-off) y cavitación severa de bombas en ascenso rápido.
- JP-4 (MIL-J-5624, 1951): Mezcla 50/50 nafta-keroseno. Excelente encendido en frío (-58 °C), pero punto de inflamación de -18 °C (alta vulnerabilidad en combate), forzando el paso a JP-8 / Jet A-1 (+38 °C).
- JP-7 (1964): Alcanos pesados (<3% arom.)

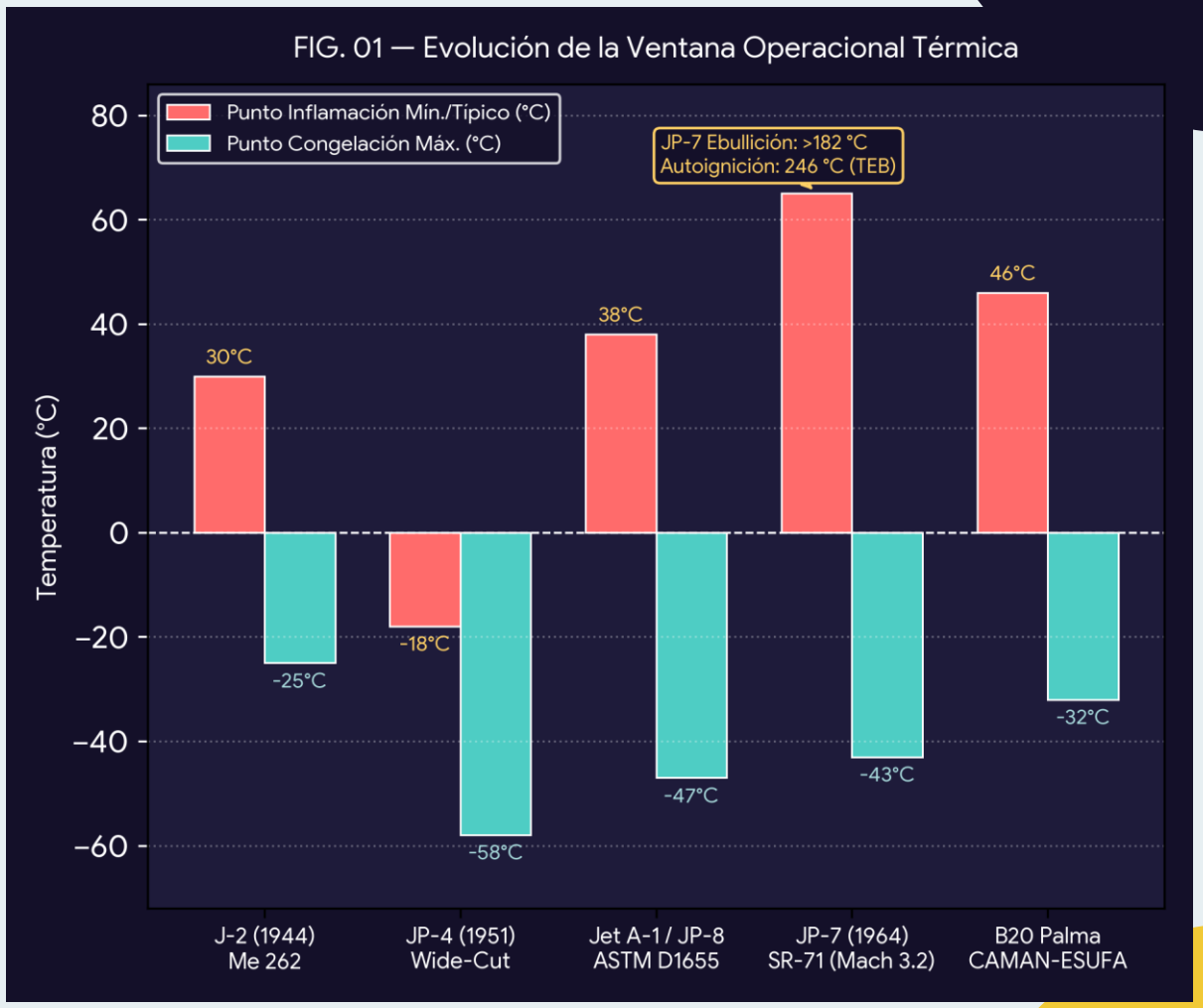


FIG. 01 — VENTANA TÉRMICA · FUENTE: CRC HANDBOOK OF AVIATION FUEL PROPERTIES (CRC REPORT NO. 635)

Lockheed SR-71 (P&W J58): La paradoja termodinámica del JP-7

¿POR QUÉ APAGABA UN FÓSFORO CON FLASH POINT DE 60–71 °C?

- A temperatura de pista (20 °C), el JP-7 (MIL-DTL-38219) está >40 °C de su punto de inflamación; su presión de vapor es casi nula y su masa térmica fría ahoga la llama.
- Punto de ebullición inicial >182 °C y temperatura de autoignición de 246 °C: una bujía eléctrica era incapaz de romper sus cadenas pesadas en flujo supersónico.
- Solución: disparo pirofórico de Trietilborano (TEB, 16 inyecciones por motor) que arde espontáneamente con O2 a -5 °C.

EL COMBUSTIBLE COMO REFRIGERANTE Y LUBRICANTE:

- A Mach 3.2 (80,000 pies), el calentamiento aerodinámico eleva el fuselaje de titanio a >300 °C.
- Sumidero térmico (Heat Sink): el JP-7 enfriaba cabina, aviónica, aceite e hidráulico a través de intercambiadores, entrando a los quemadores a ~290 °C sin coquizarse.
- Aditivo fluorocarbonado para restituir la lubricidad en bombas de engranajes de alta temperatura.



Referencias: Merlin, P. W. (2009). Design and Development of the Blackbird, NASA SP-2009-575; Specification MIL-DTL-38219D.

North American XB-70 Valkyrie: Cuando la Química destruye la Mecánica. Combustibles de Boro (Zip Fuels) y JP-6

LA PROMESA DE LOS ALQUILBORANOS (HEF-3):

- Motores General Electric YJ93 diseñados para crucero estratégico sostenido a Mach 3.0.
- Desarrollo de hidruros de boro (Etildecaborano HEF-3) con densidad energética gravimétrica de ~58 MJ/kg (+35% frente a los 43 MJ/kg del hidrocarburo).
- Objetivo: incrementar el radio de acción intercontinental sin incremento de volumen alar.

EL FRACASO MECÁNICO EN LA ZONA CALIENTE:

- La combustión de boranos producía óxido bórico (B_2O_3), un líquido viscoso entre 450 °C y 1,000 °C que solidificaba como vidrio abrasivo sobre estatores y álabes de turbina.
- Consecuencia: bloqueo aerodinámico de gargantas, erosión de recubrimientos y desbalanceo rotodinámico destructivo.
- Cancelación del programa HEF y adopción del hidrocarburo estable JP-6 (MIL-J-25656) con inertización de N_2.

Lección de Ingeniería: Ningún poder calorífico compensa la pérdida de geometría aerodinámica.



Referencias: Dequasie, A. (1991). The Green Flame: Surviving Government Secrecy (Boron Fuels); Jenkins, D. R. & Landis, T. (2002). Valkyrie: North American's Mach 3 Superbomber.

CASO DE ESTUDIO MECÁNICO-OPERACIONAL (MACH 2.02)

Concorde (Olympus 593): 95.6 t de combustible para control y enfriamiento

- Masa Total: 95,680 kg (~119,280 L) de Jet A-1 (>50% del peso máximo de despegue de 185 t).
- Control Aerodinámico (Trim CG): Al cruzar Mach 1, el centro de presión retrocede ~2 m. Para evitar resistencia por deflexión de elevones, el sistema bombeaba dinámicamente entre 12 y 20 t hacia el Tanque de Cola #11 desplazando el Centro de Gravedad.
- Sumidero Térmico: A Mach 2.02 la piel alcanza 127 °C; el Jet A-1 enfriaba cabina, hidráulico y aceite antes de quemarse a ~85 °C.

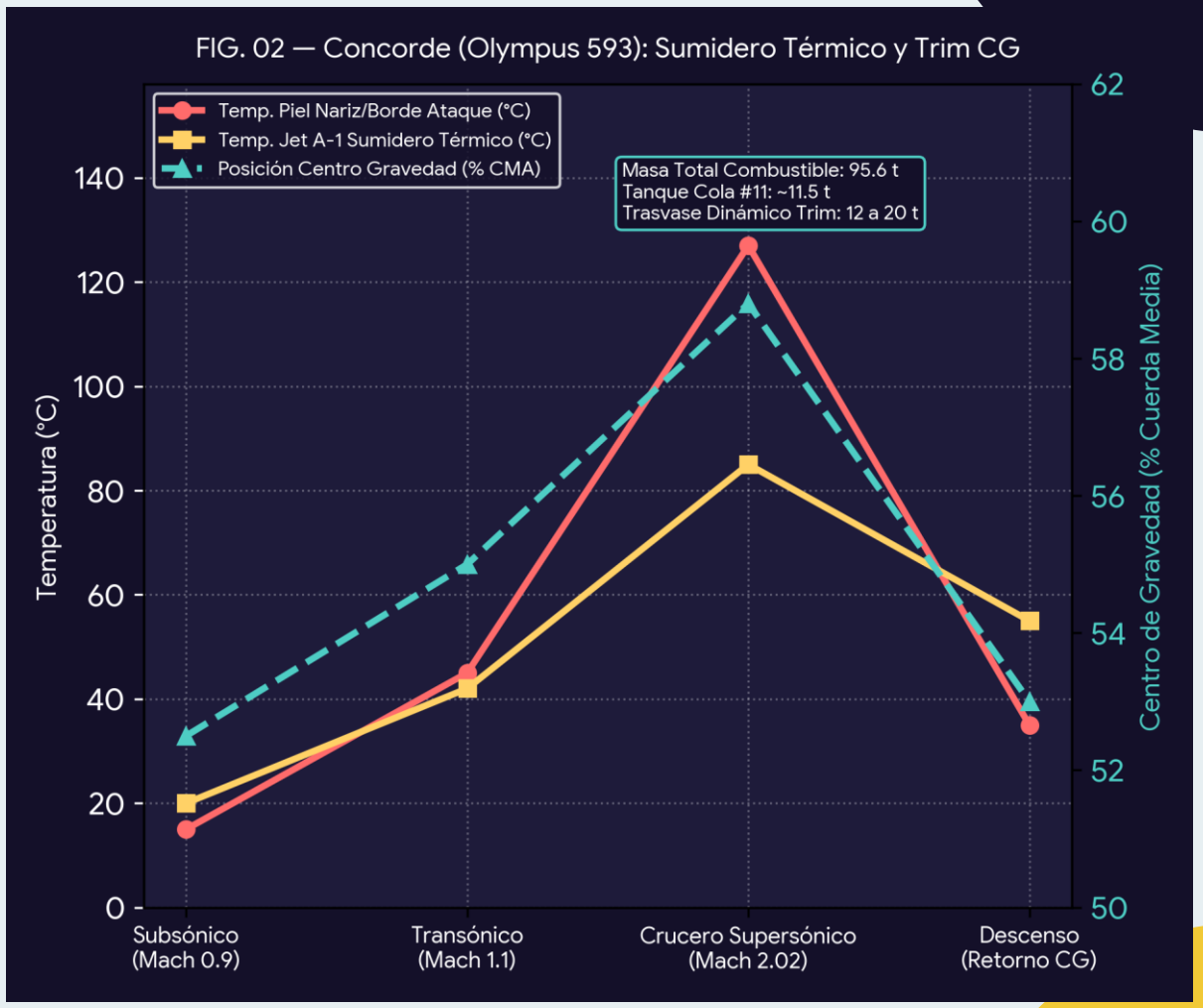


FIG. 02 — GESTIÓN TÉRMICA Y TRIM CG · FUENTE: OWEN, K. (2001). CONCORDE: SUPERSONIC PIONEER; RR/SNECMA OLYMPUS 593 MANUAL

SECCIÓN 02 · AVIACIÓN MODERNA Y DINÁMICA DE GRANDES VOLÚMENES

De 20 galones en un auto a 250 toneladas en un avión



EVOLUCIÓN TERMODINÁMICA Y MECÁNICA (1958–2026)

Salto Generacional: Del Boeing 707 (JT3C/D) al B787 (GEnx) y A350 (XWB)

- Boeing 707 (P&W JT3C/JT3D, años 60): Relación de derivación (BPR) a 1.4:1; relación de presión (OPR) 13:1; TSFC en crucero de 0.78 a 0.91 lb/(lbf·h). Alta emisión de hollín.
- Boeing 787 / Airbus A350 (GEnx-1B / Trent XWB): BPR 9.6 a 10:1; OPR de 45:1 a 50:1; TSFC reducido a ~0.50 lb/(lbf·h) (-44% en consumo específico).
- Exigencia al combustible: Con OPR 50:1, el aire sale del compresor a >680 °C; los inyectores TAPS (Twin Annular Premixing Swirler) tienen pasajes microscópicos ultra-sensibles al coque.

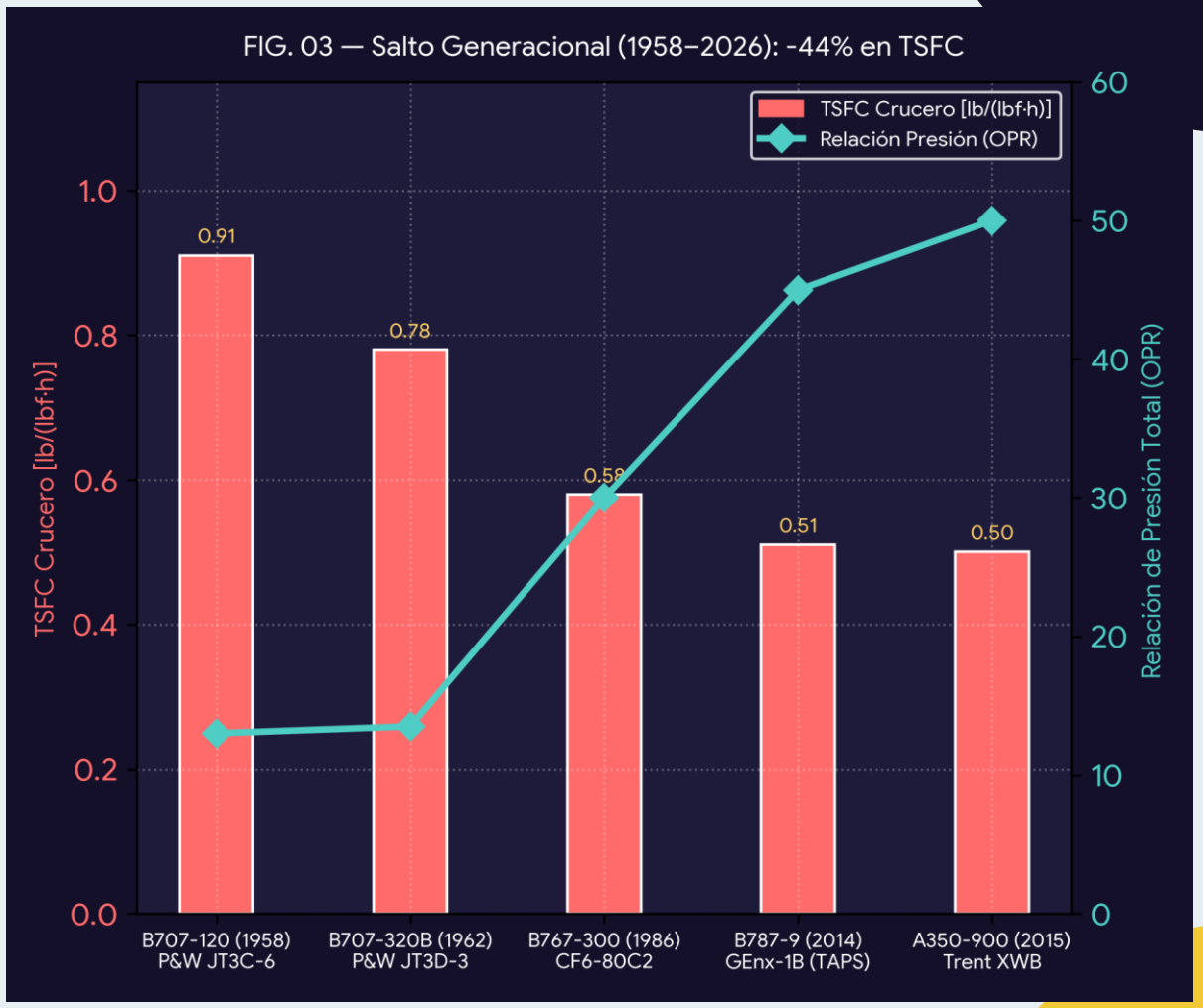


FIG. 03 — EVOLUCIÓN TSFC Y OPR · FUENTE: BALLAL & ZELINA (2004), AIAA; GE AVIATION GENX-1B & ROLLS-ROYCE TRENT XWB DATA

La magnitud física del combustible en aeronaves de gran fuselaje

254 t

AIRBUS A380 (320,000 LITROS)

Representa el 44.5% del peso máximo al despegue (575 t). Gestionado por 11 tanques, 21 bombas y 43 válvulas motorizadas.

101 t

BOEING 787-9 (126,372 LITROS)

Almacenado en alas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP), con aislamiento térmico e inertización OBIGGS.

-47 °C

LÍMITE CONGELACIÓN JET A-1

En vuelos polares de 15 h a -56 °C externos (Fuel Soaking), 100+ toneladas de líquido rozan el límite de cristalización.

Referencias: Langton, R. et al. (2009). Aircraft Fuel Systems, Wiley Aerospace Series; Airbus A380 & Boeing 787 FCOM Technical Manuals.

Implicaciones Mecánicas de Grandes Masas: Sloshing y Fatiga Alar

ALIVIO DE CARGA ALAR (WING LOAD ALLEVIATION - WLA):

- Un ala sin combustible al despegar sufriría un momento flector catastrófico en el encastre (raíz alar) debido a la sustentación aerodinámica.
- El sistema FMS consume primero el combustible de los tanques centrales y fuselaje, conservando masa líquida en la punta de los planos (Outer Tanks) como contrapeso inercial para reducir la fatiga estructural ciclos-esfuerzo (S-N).

HIDRODINÁMICA DE OLEAJE (SLOSHING) Y AEROELASTICIDAD:

- En maniobras o turbulencia severa, >100 toneladas de líquido oscilan a baja frecuencia (0.5 a 3 Hz), acoplándose con los modos propios de flexión y torsión del ala (Flutter).
- Requiere costillas deflectoras (Baffles) con válvulas de charnela unidireccionales (Flapper Check Valves) para impedir que el combustible se desplace hacia la punta o cola en banqueos y frenadas.

Referencias: Wright, J. R., & Cooper, J. E. (2014). Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads (2nd ed.). Wiley; Airbus Fuel Management System Architecture.

Retos en Estructuras Compuestas (B787 / A350): CFRP, Rayos y OBIGGS

INERCIA TÉRMICA EN ALAS DE FIBRA DE CARBONO (CFRP):

- A diferencia del aluminio tradicional, el compuesto carbono-epoxi (CFRP) del B787 y A350 tiene menor conductividad térmica transversal.
- Efecto "Termo": en vuelos de 14–16 horas a 40,000 pies, el combustible retiene el frío extremo por más tiempo (Cold Soaking) o se calienta más rápido cerca de paquetes hidráulicos, exigiendo recirculación térmica activa.

PROTECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA E INERTIZACIÓN (OBIGGS):

- Riesgo de ignición por impacto de rayo en uniones de fibra de carbono (Fastener Sparking): diseño de mallas de bronce laminadas y sellantes dieléctricos.
- Sistema OBIGGS (On-Board Inert Gas Generation System, norma FAA SFAR 88): membranas de separación de aire (ASM) inyectan aire enriquecido en nitrógeno (NEA) reduciendo el O_2 en tanques a <12% (9% militar).



Referencias: FAA SFAR 88 (Fuel Tank System Fault Tolerance Evaluation); SAE ARP 5416 (Aircraft Lightning Test Methods); Langton et al. (2009).

HIDROMECÁNICA DE BOMBEO Y SUCCIÓN (SAE ARP 4990)

Tren de Bombeo Aeronáutico: Cavitación y Margen NPSH en Ascenso

• Tren en Serie: Bombas centrífugas de tanque (Boost) + Eyectores Venturi (Jet Pumps) + Bomba LP centrífuga + Bomba HP de engranajes (1,200–3,000 psi).

• Condición de Cavitación: Al ascender a 40,000 pies cae la presión atmosférica sobre el tanque. Si falla la bomba Boost o el combustible tiene alta presión de vapor (JP-4 / gases disueltos por Ley de Henry), NPSH_disp < NPSH_req.

• Daño Mecánico: Implosión de burbujas a >1,000 MPa, erosionando álabes, picando engranajes HP y fluctuando el flujo.

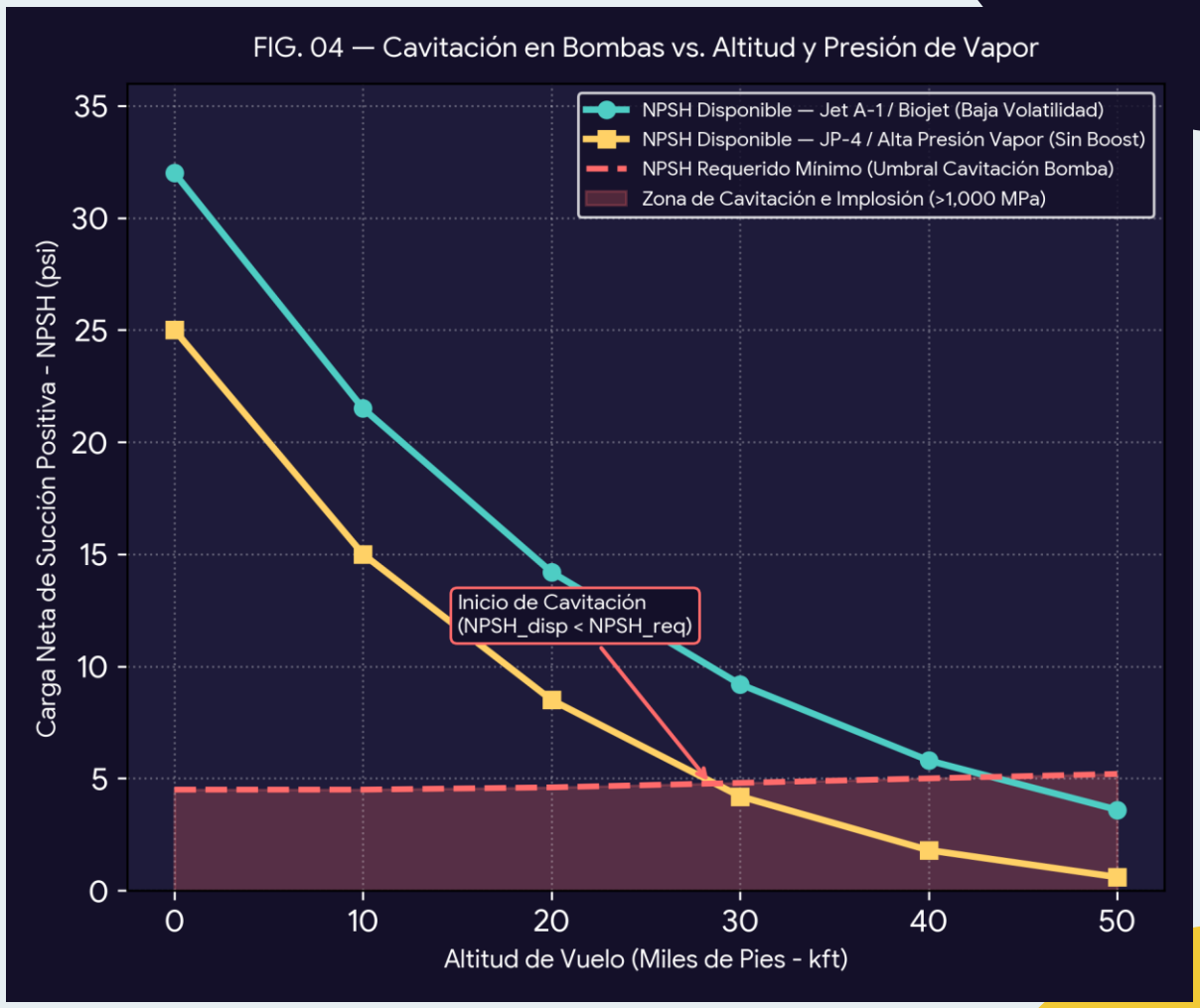


FIG. 04 — CURVAS NPSH VS. ALTITUD · FUENTE: SAE ARP 4990 (PUMP CAVITATION) & LANGTON ET AL. (2009)

Congelación, Cristalización de Parafinas e Intercambiador FOHE

CLOUD POINT Y GELIFICACIÓN EN VUELO:

- Antes de llegar al punto de congelación total (-47 °C en Jet A-1; -30 a -35 °C en mezclas B20), el combustible alcanza el Punto de Enturbiamiento (Cloud Point).
- Las cadenas parafínicas y ésteres saturados nuclean formando redes cristalinas de cera que atrapan el líquido, disparando la viscosidad aparente (fluido no-newtoniano) y bloqueando mallas de succión.

EL ROL CRÍTICO DEL INTERCAMBIADOR FOHE (CASO B777 BA38):

- El Intercambiador de Calor Combustible-Aceite (FOHE) transfiere calor del aceite del motor (90–120 °C) al combustible frío (-35 °C) antes del filtro principal y del FCU.
- En el vuelo BA38 (2008), hielo acumulado en las tuberías se liberó de golpe al pedir empuje en aproximación, taponando la placa frontal de los tubos del FOHE y restringiendo el empuje.

Referencias: AAIB Aircraft Accident Report 1/2010 (Boeing 777-236ER G-YMMM at London Heathrow); ASTM D2386 (Freezing Point of Aviation Fuels).

TERMODINÁMICA CRIOGÉNICA Y VOLUMEN ESTRUCTURAL (ADLER & MARTINS, 2023)

¿Por qué no Hidrógeno (LH2) hoy? Volumen (4x) y Criogenia a -253 °C

- La Trampa Volumétrica: El H2 tiene 3 veces más energía por kilo (120 MJ/kg vs. 43.2 MJ/kg), pero su densidad líquida es ínfima (71 kg/m³ vs. 800 kg/m³). Tiene 4 veces menos energía por litro (8.5 MJ/L vs. 34.7 MJ/L).
- Imposible llevarlo en las Alas: Requiere 4 veces más volumen (512 m³ vs. 126 m³ en un B787) en tanques cilíndricos pesados (+38 t) dentro del fuselaje a -253 °C (20 K), restando pasajeros y perdiendo el alivio de carga alar.

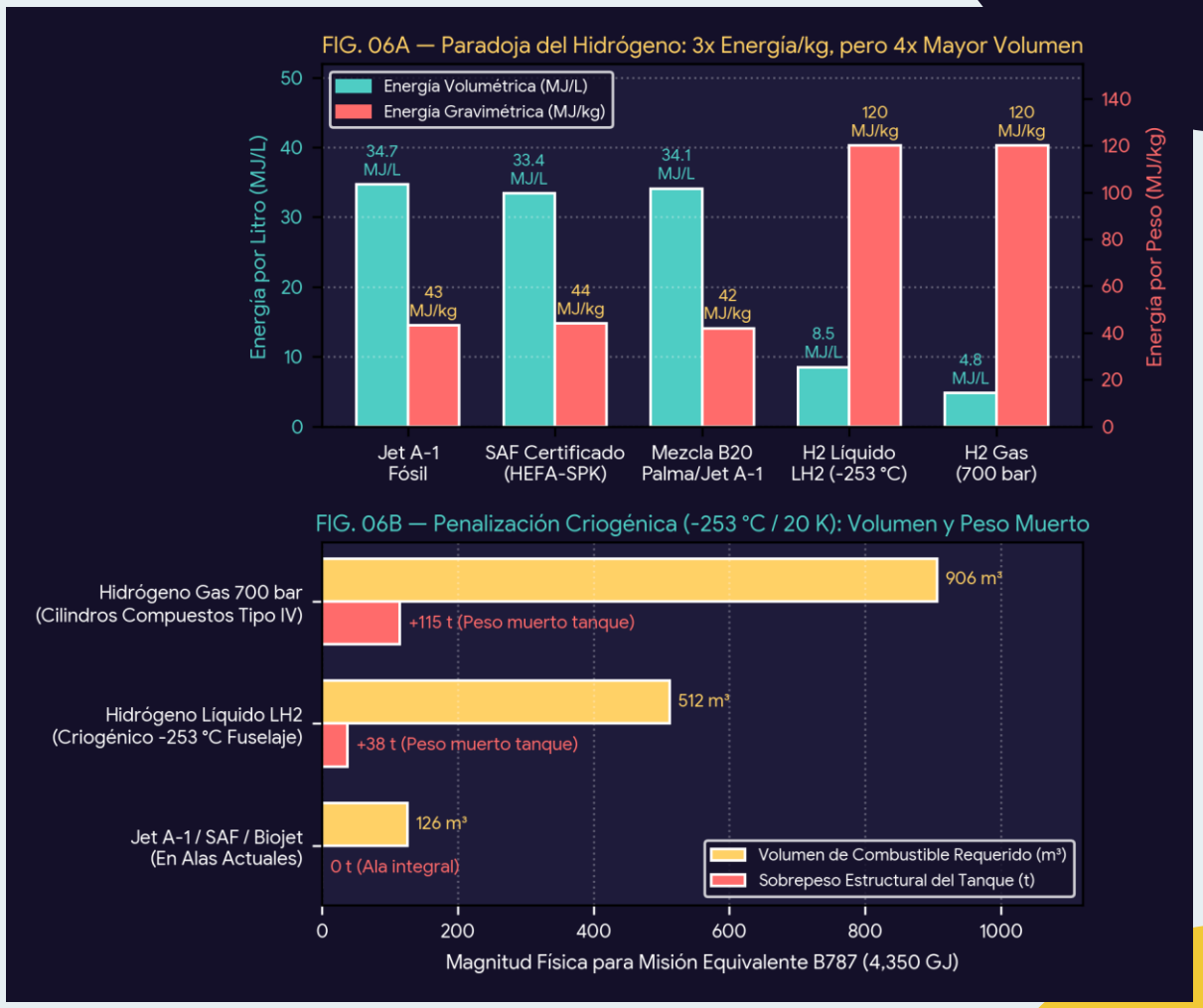


FIG. 06 — DENSIDAD VOLUMÉTRICA Y PENALIZACIÓN CRIOGÉNICA LH_2 · FUENTE: ADLER & MARTINS (2023), PROG. AEROSP. SCI.; CLEAN SKY 2

Barreras Mecánicas del Hidrógeno (20 K) y la Urgencia de los Biocombustibles

RETOS MECÁNICOS Y METALÚRGICOS DEL LH2 (-253 °C):

- Fragilización por Hidrógeno (Hydrogen Embrittlement): El átomo H difunde en la red cristalina de aceros de alta resistencia y aleaciones de titanio/níquel en bombas y válvulas, provocando fractura frágil súbita bajo esfuerzo.
- Ebullición (Boil-off) y Licuefacción: Mantener 20 K exige aislamiento multicapa al vacío; el calor parásito evapora de 1% a 3% diario. Licuar H2 consume ~30% de la energía contenida en el propio combustible.

CONCLUSIÓN ESTRATÉGICA PARA LA AVIACIÓN (2026–2050):

- Baterías: Viables solo en aeronaves pequeñas, drones y tramos regionales cortos (<500 km) donde la Ley Cuadrado-Cubo lo permite.
- Hidrógeno: Exige rediseñar desde cero los aviones (tanques en fuselaje) y toda la red criogénica mundial de aeropuertos (horizonte >2040–2050).
- Por tanto, en aeronaves medianas, grandes y militares (PT6, J69, B787, A350), los combustibles líquidos Drop-in (SAF y Biocombustibles) son la única solución física y mecánicamente viable.

Referencias: Brewer, G. D. (1991). Hydrogen Aircraft Technology, CRC Press; National Academies (2016). Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research.

SECCIÓN 03 · QUÍMICA, COMBUSTIÓN, VIBRACIONES Y METALURGIA

Fósiles (Jet A-1 / JP) vs. SAF vs. Mezclas de Biocombustibles

MATRIZ COMPARATIVA PARA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA AERONÁUTICA

Matriz Físico-Mecánica: Jet A-1 / JP-8 vs. SAF vs. Biocombustibles

- Enfoque de Mecánico: Más allá de la formulación orgánica, el motor percibe tres variables críticas: Densidad (dosificación en FCU), Viscosidad (tamaño de gota SMD) y Poder Calorífico (TSFC).
- Contraste Clave: El SAF (ASTM D7566) ofrece baja viscosidad y alta energía pero carece de lubricidad y aromáticos; las mezclas de biocombustibles (FAME/Palma) aportan excelente lubricidad y oxígeno interno, exigiendo controlar la viscosidad en frío.

FIG. 05 — MATRIZ COMPARATIVA DE INGENIERÍA · FUENTE: ASTM D1655 / D7566; CRC REPORT NO. 635

FIG. 05 — Matriz de Ingeniería: Fósil vs. SAF vs. Biocombustibles

Parámetro Mecánico	Fósil (Jet A-1 / JP-8)	SAF Certificado (ASTM D7566)	Mezclas Biojet (No-SAF · Palma/FAME)
Molécula y Oxígeno	Apolar C8–C16 0% O2 | 18% Arom.	Isoparafina Drop-in 0% O2 | 0% Arom. (puro)	Éster Polar (FAME) 10–11% O2 intrínseco
Densidad (Dosif. FCU)	775–840 kg/m³ Base calibración FCU	730–770 kg/m³ (Ligero) Exige +flujo volumétrico	860–885 kg/m³ (Pesado) Altera relación vol/masa
Viscosidad (-20 °C / SMD)	3.5–5.0 mm²/s Atomización óptima	2.5–4.5 mm²/s Excelente en frío	6.0–14.5 mm²/s (>B20) Ideal en Slinger Ring
Energía LHV y TSFC	~43.2 MJ/kg TSFC base (0%)	~44.0 MJ/kg (+1.5%) -1% consumo másico	~37.2–41.9 MJ/kg +1.2 a +2.9% TSFC
Lubricidad (BOCLE)	Moderada (~0.65 mm) Protección estándar	Baja en puro (>0.75 mm) Exige aditivo DCI-4A	Sobresaliente (<0.50 mm) Película polar en bombas
Sellos (O-Rings)	Hinchamiento +11% Sello hermético NBR	Contracción (-3.5%) Exige mín. 8% aromáticos	Sobre-hinchamiento NBR Requiere Viton (FKM)
Cámara y Hollín	Tendencia a hollín Radiación al liner	Quema limpia -50% a -70% hollín	Oxígeno interno reduce -18% a -35% hollín

Matriz Operacional: Ventajas y Desventajas Mecánicas en el Motor

SAF CERTIFICADO (HEFA / FT - ASTM D7566):

- [+] Ventajas Mecánicas: Excelente fluidez criogénica (-47 a -60 °C), alta energía gravimétrica (+1.5% LHV) y reducción del 50–70% en hollín (menor radiación térmica al liner).
- [-] Desventajas Mecánicas: Pésima lubricidad natural en estado puro (cicatriz BOCLE >0.75 mm, riesgo de micropitting en engranajes de bombas HP) y contracción de sellos de nitrilo (-3.5%) por ausencia de aromáticos.

MEZCLAS DE BIOCOMBUSTIBLES (NO-SAF · PALMA / FAME):

- [+] Ventajas Mecánicas: Sobresaliente lubricidad tribológica en bombas (cicatriz BOCLE <0.50 mm sin aditivos) y reducción de 18–35% en hollín gracias a su 10–11% de oxígeno molecular.
- [-] Desventajas Mecánicas: Alta viscosidad en mezclas >B20 (agranda el SMD en inyectores de orificio fijo, aunque ideal para Slinger Ring en J69), sobre-hinchamiento en NBR (exige Viton FKM) y control de Na/K.

Referencias: Corporan, E. et al. (2011), Energy & Fuels; ASTM D5001 (BOCLE Lubricity); Protocolos CAMAN – ESUFA.

INTEGRIDAD MECÁNICA DE SELLOS Y JUNTAS TÓRICAS (O-RINGS)

El Talón de Aquiles del SAF: Contracción de Elastómeros vs. Aromáticos

• En un motor operado con Jet A-1/JP-8, el 15–20% de compuestos aromáticos se difunde en la matriz polimérica de los sellos de Nitrilo (NBR) y Fluorosilicona, provocando un hinchamiento controlado (+8% a +14%) que mantiene la presión de contacto.

• Falla en SAF Puro (0% Aromáticos): al pasar de Jet A-1 a SAF parafínico puro, los aromáticos migran fuera del sello; el elastómero se contrae (-3.5%) y pierde elasticidad, causando fugas de combustible a alta presión.

• Por ello, ASTM D7566 exige mínimo 8% de aromáticos en la mezcla final.

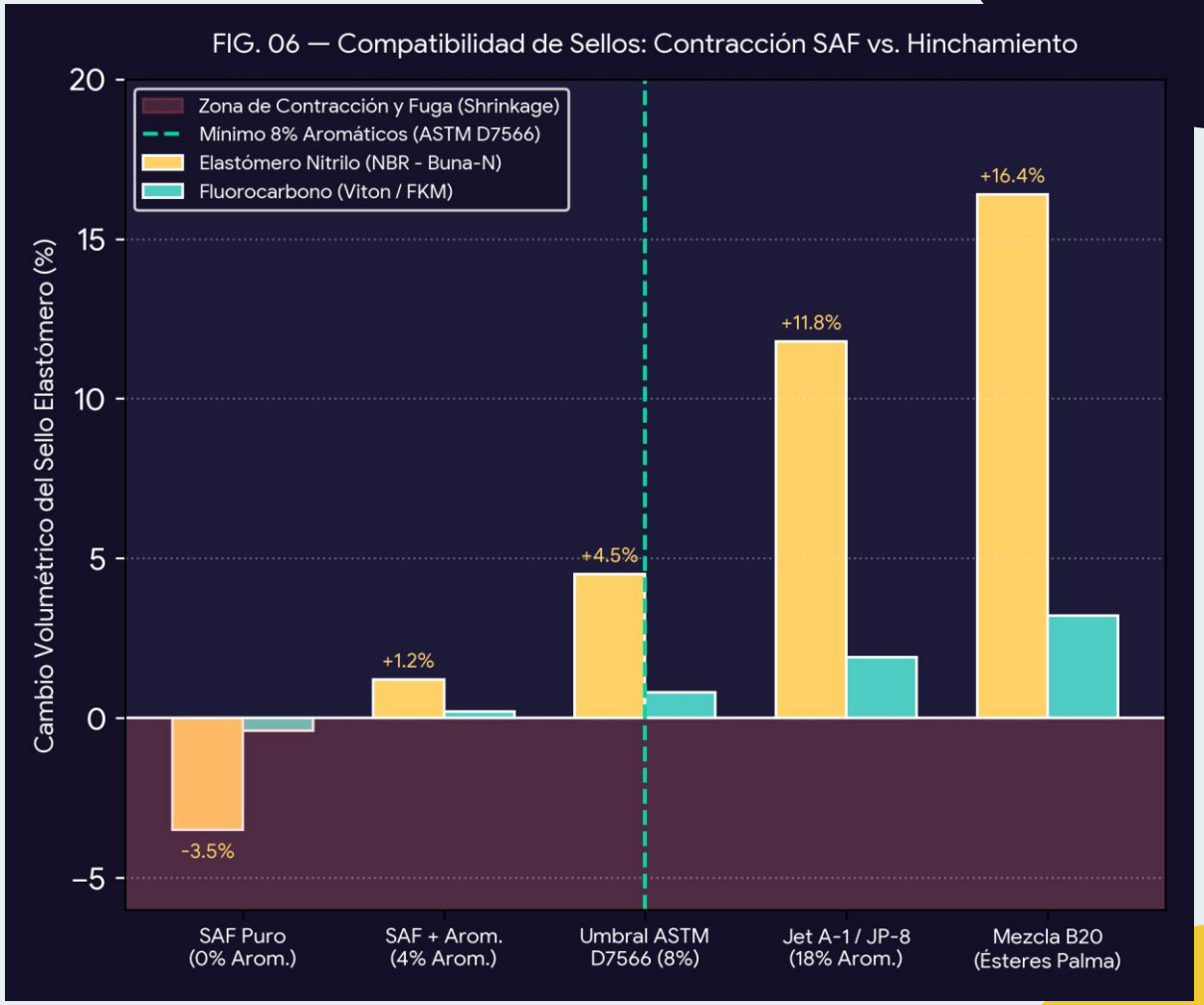


FIG. 06 — CAMBIO VOLUMÉTRICO EN SELLOS · FUENTE: CORPORAN ET AL. (2011), ENERGY & FUELS 25(3); AFRL / FAA SEAL SWELL STUDIES

MECÁNICA DE FLUIDOS EN EL INYECTOR (PULVERIZACIÓN)

Del tanque al Inyector: Afectación del Empuje por Alta Viscosidad

- Ecuación de Atomización: El Diámetro Medio de Sauter (SMD) crece cuando aumenta la viscosidad cinemática (μL) y la tensión superficial (σ) en mezclas pesadas o frías.
- Pérdida de Empuje y Estabilidad: Gotas más grandes tardan más en evaporarse (Ley de Godsave), desplazando el frente de llama hacia atrás, reduciendo la eficiencia de combustión en ralentí y estrechando el margen de apagado pobre (Lean Blowout - LBO).
- Límite ASTM D1655: máximo 8.0 mm²/s a -20 °C (12 mm²/s a -40 °C en D4054).

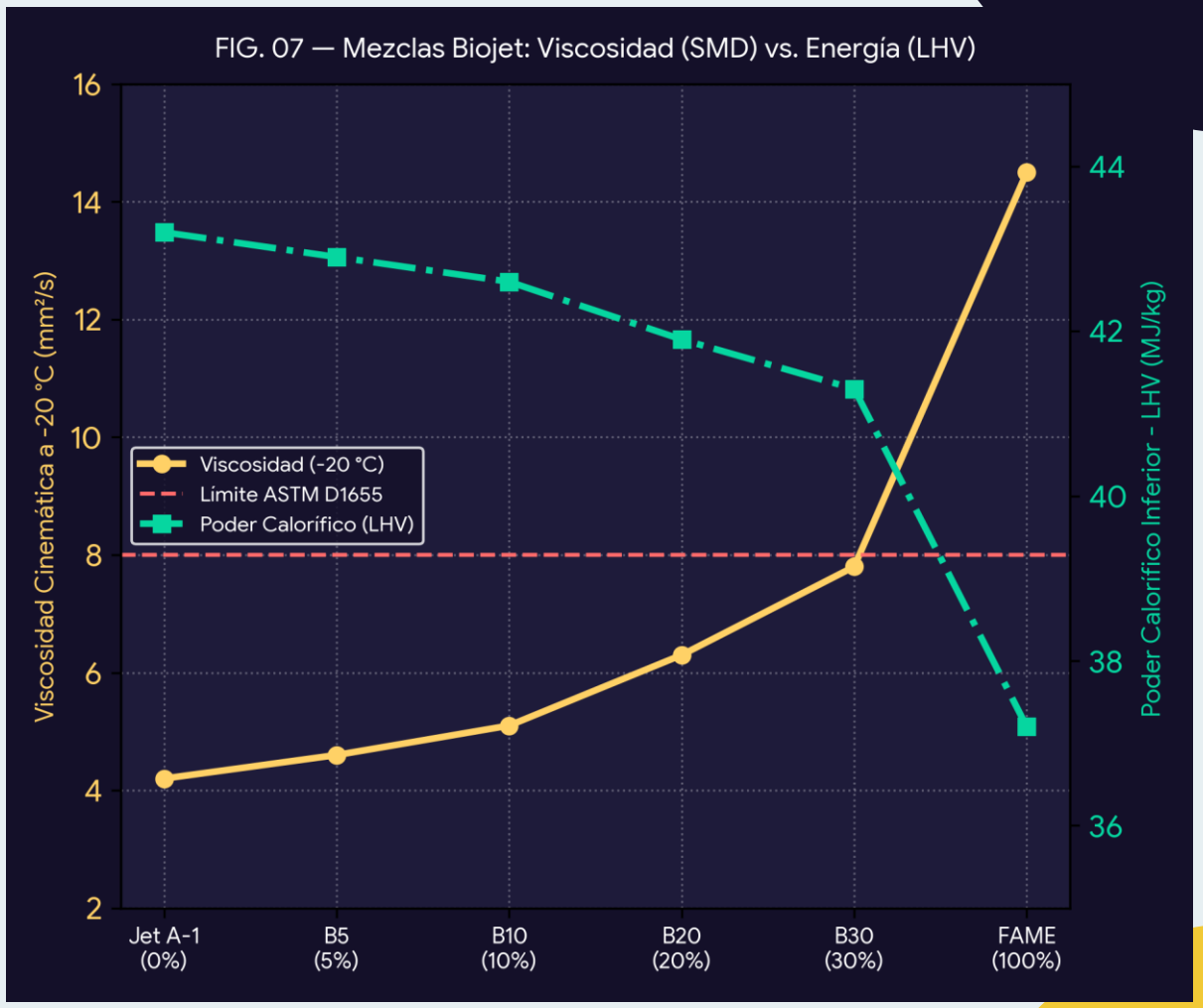


FIG. 07 — VISCOSIDAD VS. LHV · FUENTE: LEFEBVRE, A. H. (1989). ATOMIZATION AND SPRAYS; ASTM D4054 FAST TRACK

Incidencia en Vibraciones: Criterio de Rayleigh y Asimetría Térmica

- Acoplamiento Termoacústico (Criterio de Rayleigh): Retrasos en el tiempo de evaporación de gotas viscosas generan pulsaciones de liberación de calor en fase con ondas acústicas (Combustion Rumble, 100–250 Hz), induciendo fatiga de alto ciclo (HCF) en el liner.
- Vibración Mecánica en Rodamientos (1X Rotor): Si un inyector pulveriza de forma asimétrica por coquización o viscosidad, distorsiona el perfil circunferencial de temperatura (Pattern Factor), arqueando térmicamente el rotor y elevando los IPS de vibración.

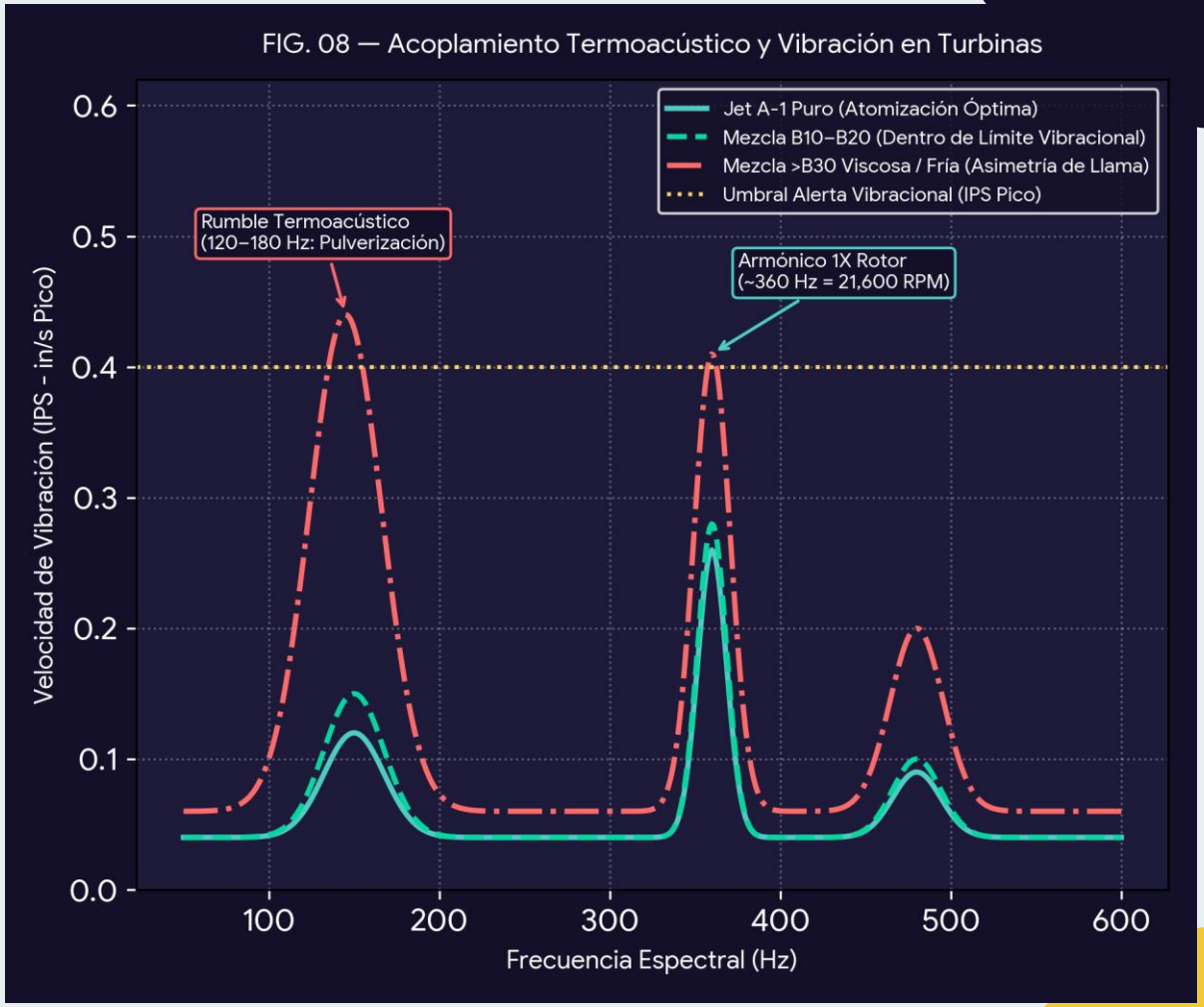


FIG. 08 — ESPECTRO DE VIBRACIONES Y TERMOACÚSTICA · FUENTE: LIEUWEN, T. & YANG, V. (2005). COMBUSTION INSTABILITIES IN GAS TURBINES, AIAA

Degradación Superficial: Sulfatación Alcalina (Tipo I y II) y Recubrimientos

QUÍMICA METALÚRGICA Y BARRERAS TÉRMICAS (Pt-Al / MCrAlY):

- El álabe sobrevive gracias a una capa pasiva nanométrica de alúmina (Al_2O_3) o Oxido de Cromo (Cr_2O_3).
- Trazas alcalinas de Sodio (Na) o Potasio (K) del catalizador del biocombustible reaccionan con el azufre formando Sulfato de Sodio (Na_2SO_4).
- Corrosión en Caliente Tipo I (850–950 °C): El Na_2SO_4 funde a 884 °C, disuelve la capa de Al_2O_3 (fluxing básico) y forma sulfuros líquidos en bordes de grano (Ni_3S_2) que fracturan el álabe.

CORROSIÓN TIPO II (650–750 °C) Y CONTRASTE TRIBOLÓGICO:

- Corrosión en Caliente Tipo II (650–750 °C): En zonas más frías (turbina libre PT6), eutécticos Na_2SO_4-$CoSO_4$ producen picado profundo localizado (pitting) y exfoliación (spallation) de recubrimientos TBC.
- Contraste en Zona Fría (Tribología BOCLE ASTM D5001): Mientras Na/K deben ser <1 ppm para proteger la turbina, los grupos éster del biocombustible reducen la cicatriz de desgaste en bombas HP a <0.50 mm.

Referencias: Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (1987). Superalloys II, Wiley; Eliaz, N. et al. (2002), Eng. Fail. Anal., 9(1), 31–43; ASM Handbook Vol. 13C.

RESISTENCIA DE MATERIALES EN TURBINA (REED, 2006; CALLISTER, 2020)

Mecánica de Zona Caliente: Fluencia Lenta (Creep)

• Estado de Esfuerzos en Álabes (Inconel 713C / Mar-M-247 / CMSX-4): Sometidos a tracción centrífuga (σ150–400 MPa) a 850–1,050 °C.

• Parámetro de Larson-Miller y Regla de los +15 a 20 °C: Si una mala atomización distorsiona el Pattern Factor creando una racha caliente (Hot Streak), un aumento local de solo +15 a 20 °C en el metal reduce la vida a la fluencia (Creep-Rupture) exactamente a la mitad (50%).

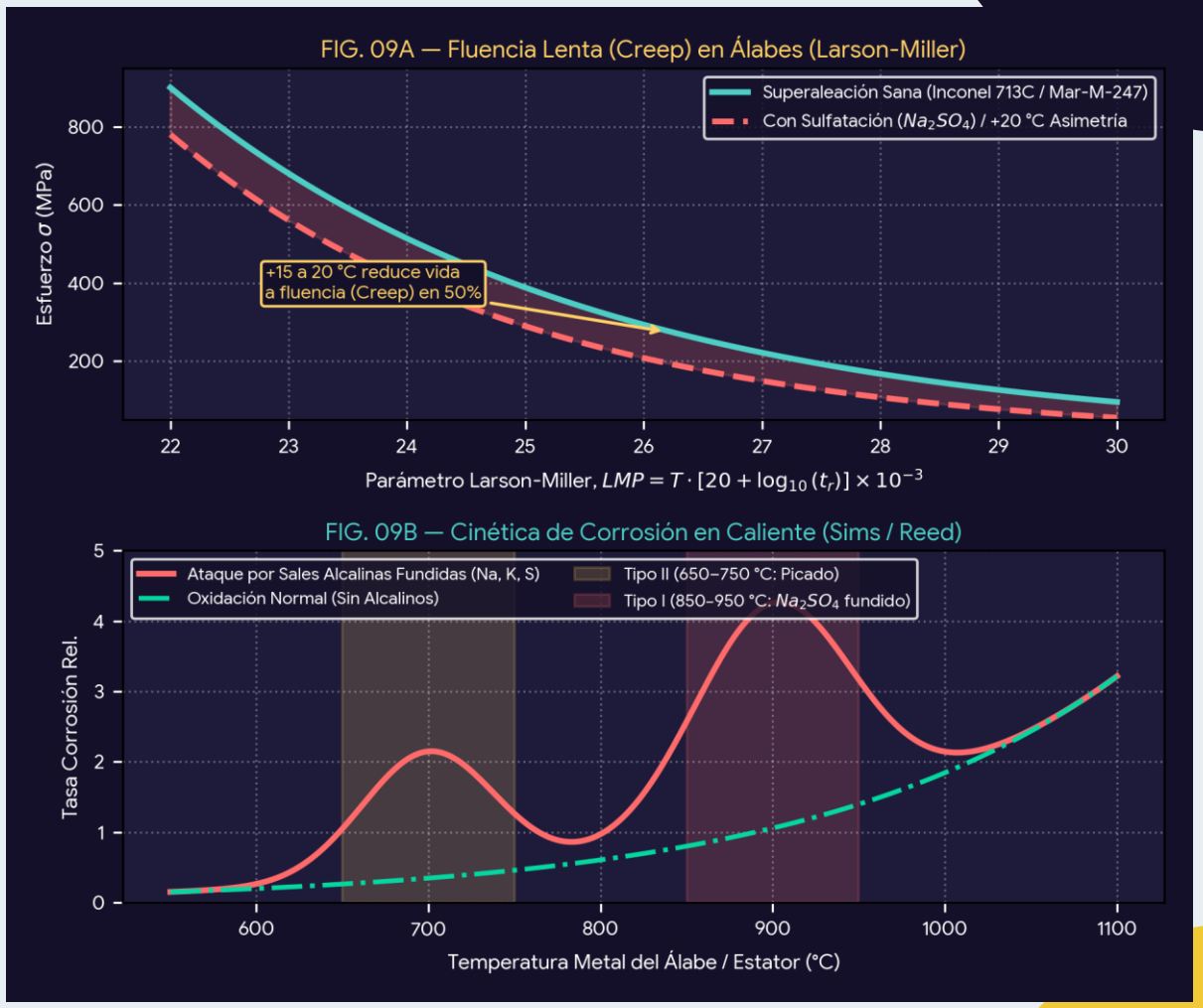


FIG. 09 — FLUENCIA LARSON-MILLER Y CINÉTICA DE CORROSIÓN · FUENTE: REED, R. C. (2006). THE SUPERALLOYS, CAMBRIDGE UNIV. PRESS; SIMS ET AL. (1987)

SECCIÓN 04 · EXPERIENCIAS EN CAMAN – ESUFA

Laboratorio vivo: Bancos de prueba y motores PT6 y J69

Seis años de experimentación real en la Fuerza Aeroespacial Colombiana

06

Investigación experimental en el Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN, Madrid) y ESUFA con mezclas de biocombustibles nacionales.

PT6 / J69

DOS ARQUITECTURAS

Pruebas en motores operativos: Turbohélice Pratt & Whitney PT6A y Turborreactor Teledyne J-69.

A/M37T

Celdas de ensayo en tierra instrumentadas para evaluar empuje, torque, TSFC, EGT/ITT, vibraciones y emisiones.

Fuente Propia: Grupo de Investigación ESUFA – Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN), Fuerza Aeroespacial Colombiana.

EVIDENCIA EXPERIMENTAL PROPIA · CAMAN – ESUFA

Banco de Pruebas y Motor Turbohélice Pratt & Whitney serie PT6A

- Configuración en Banco Móvil/Estático: Evaluación de mezclas de biocombustibles (derivados de palma, palmiste y alcoholes) con Jet A-1 en motor PT6A.
- Variables Mecánicas Críticas: Respuesta de la Unidad de Control de Combustible (FCU) hidromecánica-neumática, precalentamiento en el intercambiador combustible-aceite y atomización en los 14 inyectores de la cámara anular de flujo inverso.
- Monitoreo: Torque en eje de hélice, RPM (Ng / Np), temperatura inter-turbina (ITT), presión de aceite y vibraciones.



FIG. 10 — MONTAJE EXPERIMENTAL MOTOR PT6 EN BANCO DE PRUEBAS · FUENTE PROPIA (CAMAN – ESUFA)

EVIDENCIA EXPERIMENTAL PROPIA · CAMAN – ESUFA

Celda de Pruebas A/M37T-20 y Turborreactor Teledyne CAE J69

• Montaje en Bancada con Campana de Admisión (Bellmouth): Instrumentación directa de presiones, temperaturas de gases de escape (EGT), celda de carga de empuje y consumo másico/volumétrico.

• El Secreto Mecánico del J69 (Slinger Ring): Su inyector rotativo centrífugo solidarizado al eje principal (>21,000 RPM) proyecta el combustible radialmente a altísima velocidad tangencial, rompiendo la tensión superficial de mezclas viscosas sin taponar boquillas.



FIG. 11 — TURBORREACTOR TELEDYNE J69 INSTRUMENTADO EN BANCO · FUENTE PROPIA (CAMAN – ESUFA)

Cabinas de Mando, Telemetría y Adquisición de Datos en Banco

- Cabina de Control : Integración de indicadores analógicos de respaldo e interfaces digitales de monitoreo en tiempo real (curvas transitorias de aceleración, presiones de combustible/aceite, EGT/ITT y flujo).

- Rigor Experimental: Ejecución de perfiles escalonados de potencia (Idle, 75%, 90%, Máximo) comparando línea base de Jet A-1 frente a mezclas experimentales, verificando estabilidad dinámica y ausencia de oscilaciones de presión.



FIG. 12 — CONSOLAS DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN PT6 Y J69 · FUENTE PROPIA (CAMAN – ESUFA)

BALANCE TERMODINÁMICO Y AMBIENTAL EN BANCO

Desempeño Experimental: Consumo Específico (TSFC) vs. Emisiones (J-69)

- Consistencia Energética: En mezclas bajas a intermedias (B5 a B20), el motor mantiene su empuje nominal y estabilidad rotodinámica, registrando un incremento moderado en TSFC (+1.2% a +2.9%) directamente proporcional al menor LHV del éster.
- Combustión Más Limpia: La presencia de ~10–11% de oxígeno molecular en el biocombustible oxida los precursores aromáticos en la zona primaria, logrando reducciones del 18% al 35% en opacidad e índice de hollín, y menor radiación térmica hacia el liner.

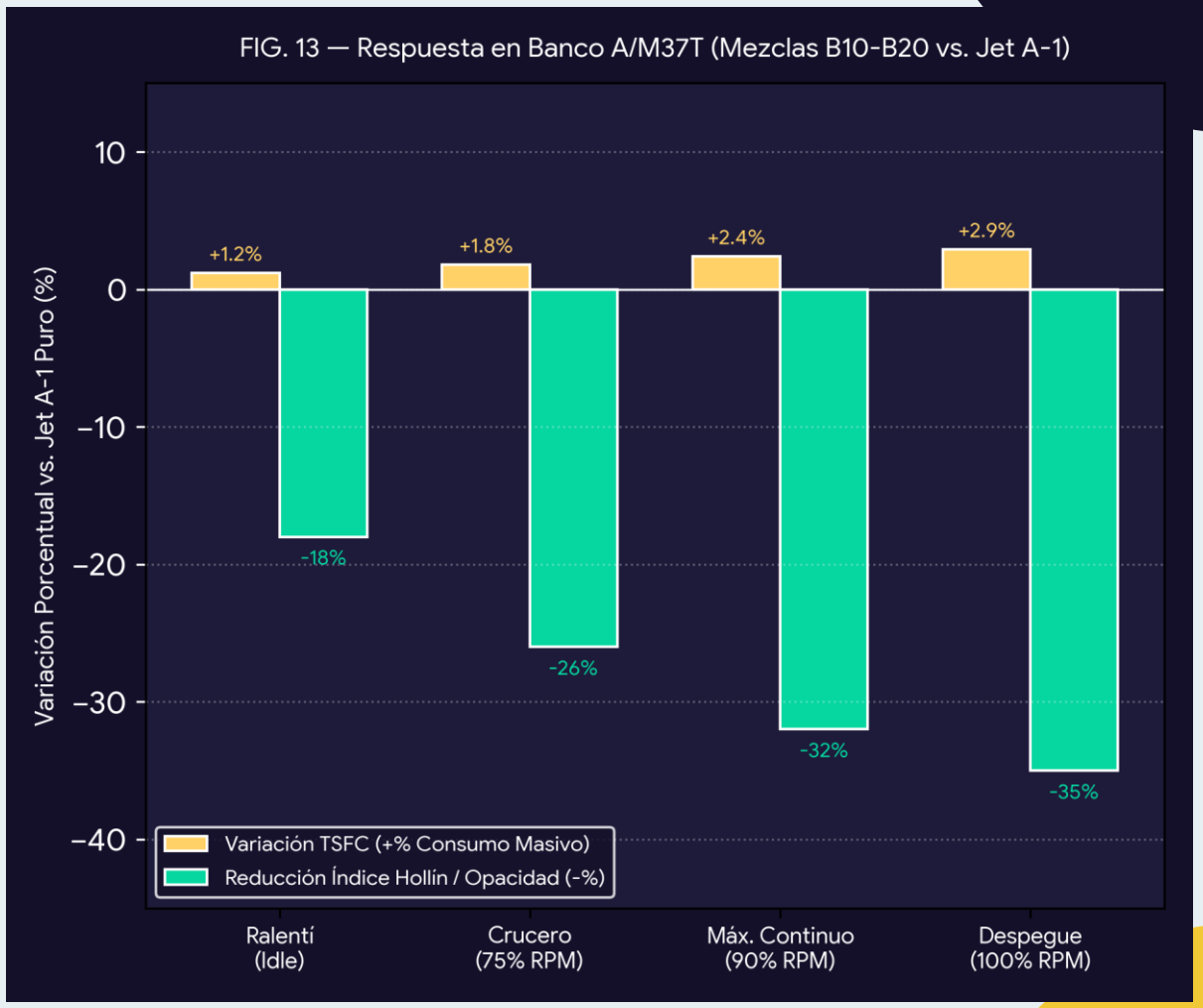
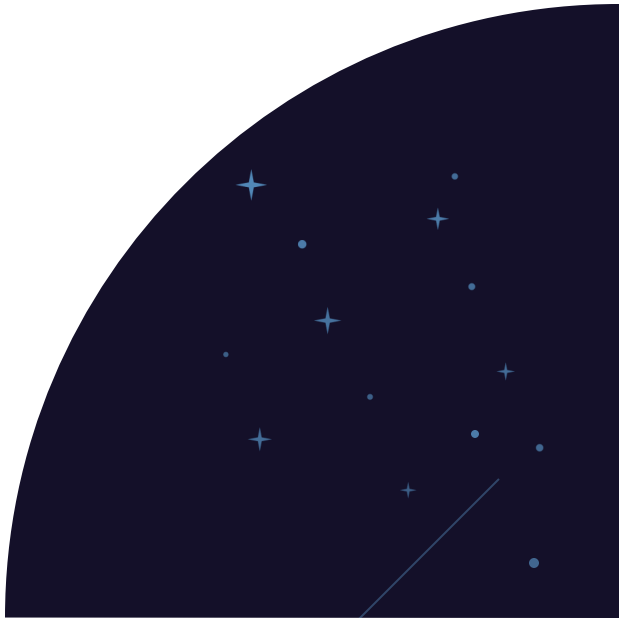


FIG. 13 — VARIACIÓN DE TSFC Y HOLLÍN EN ENSAYOS · FUENTE PROPIA (CAMAN-ESUFA) & PROTOCOLOS ISO 8178

«Un nuevo combustible no se aprueba en un tubo de ensayo; se valida cuando los componentes de los sistemas del Motor operan en sus parámetros funcionales sin perder confiabilidad operacional.»



De la Evidencia a la Acción: Hoja de Ruta Uniandes – ESUFA (2026–2030)

HACIA LA MESA TALLER 1 (12:00 - 13:00):

Modernización de Bancos e Instrumentación

- Actualización tecnológica de los bancos A/M37T-20/T-21 y
- Adquisición DAQ sincronizada de alta frecuencia: flujómetros másicos Coriolis, acelerómetros piezoeléctricos FFT, celdas de carga digitales y analizadores de gases ISO 8178.
- Gemelos digitales termodinámicos.

HACIA LA MESA TALLER 2 (14:00 - 15:00):

Protocolos de Corroboración y Sostenibilidad

- Estandarización de protocolos de ensayo bajo lineamientos ISO/IEC 17025 y análisis de incertidumbre experimental.
- Caracterización tribológica, elastomérica y metalográfica de zona caliente post-ensayo.
- Escalamiento de materias primas nacionales hacia rutas de certificación SAF (ASTM D4054 / D7566 / CORSIA).

Soporte Científico, Normativo y Referencias Bibliográficas Verificables

LITERATURA CIENTÍFICA, METALURGIA Y RESISTENCIA DE MATERIALES:

1. Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions (3rd ed.). CRC Press.

2. Reed, R. C. (2006). The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press.

3. Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (1987). Superalloys II: High-Temperature Materials. Wiley.

4. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering (10th ed.). Wiley.

5. Merlin, P. W. (2009). Design and Development of the Blackbird. NASA SP-2009-575.

6. Langton, R. et al. (2009). Aircraft Fuel Systems. Wiley Aerospace Series.

ESTÁNDARES, NORMATIVA Y ARTÍCULOS REVISADOS POR PARES:

7. Coordinating Research Council (2004). Handbook of Aviation Fuel Properties (CRC Report No. 635).

8. Corporan, E. et al. (2011). "Studies of Alternative Jet Fuels", Energy & Fuels, 25(3), 955–966.

9. Eliaz, N. et al. (2002). "Hot corrosion in gas turbine components", Eng. Fail. Anal., 9(1), 31–43.

10. Lieuwen, T., & Yang, V. (2005). Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines. AIAA Vol. 210.

11. ASTM D1655 / D7566 / D4054 / D5001 & SAE ARP 4990.

12. Informes Técnicos y Ensayos en Banco CAMAN – ESUFA (2020–2026).

Gracias

CONTACTO

juanpa@esufa.edu.co

ANEXO 3

PLAN DE TRABAJO CUATRIENAL ESCUADRÓN DE INVESTIGACIÓN (ESINV - ESUFA)

2027 – 2031

TABLA DE CONTENIDO

- 1. IDENTIFICACIÓN Y DATOS GENERALES DEL PLAN
- 2. OBJETIVOS DEL PLAN CUATRIENAL (2027 – 2031)
    - 2.1. Objetivo General
    - 2.2. Objetivos Específicos
- 3. MARCO ESTRATÉGICO E INSTITUCIONAL
    - 3.1. Antecedentes del Escuadrón de Investigación
    - 3.2. Marco Normativo y Doctrinal Aplicable
    - 3.3. Alineación con la Misión y Visión Institucional
    - 3.4. Articulación con los Objetivos Estratégicos de la Fuerza Aeroespacial Colombiana
    - 3.5. Articulación con las Instancias Rectoras del SEFAC y del SCtEI
    - 3.6. Inserción Sistémica en el SCtEI y Articulación con los Programas de Educación Superior
    - 3.7. Capacidades de Investigación Asignadas al Escuadrón
    - 3.8. Relación con Grupos, Semilleros, Centros y demás Actores de Investigación
- 4. DIAGNÓSTICO DE CAPACIDADES
    - 4.1. Estado Actual del Escuadrón de Investigación
    - 4.2. Capacidades Científicas y Tecnológicas Disponibles
    - 4.3. Talento Humano Disponible y Formación del Personal Investigador
    - 4.4. Recursos Bibliográficos, Normativos y Bases de Datos
    - 4.5. Necesidades y Brechas Identificadas
    - 4.6. Análisis Estratégico DOFA

    - 4.7. Problemas Prioritarios para Atender durante el Cuatrienio (2027–2031)
- 5. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN
- 6. IMPACTO ESPERADO EN LA FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA (FAC)
- 7. ESTRATEGIAS Y PORTAFOLIO DE MACROPROYECTOS CUATRIENALES (2027 – 2031)
    - 7.1. Metodología de Gestión por Macroproyectos ("Proyectos Paraguas")
    - 7.2. Portafolio de Macroproyectos Estratégicos según Programas del SCtEI y Tecnologías ESUFA
        - 7.2.1. MACROPROYECTO No. 1: Modernización y Evaluación de Biocombustibles (SAF) en Bancos AM37T-20 y AM37T-21
        - 7.2.2. MACROPROYECTO No. 2: Puesta a Punto Integral, Sostenimiento Logístico, Modernización Inmersiva e Investigación Aplicada en el Simulador de Silla de Eyección con Brazo Robótico FANUC
    - 7.3. Componentes Técnicos Estructurales del Macroproyecto No. 1
    - 7.4. Componentes Técnicos Estructurales del Macroproyecto No. 2 (Simulador de Silla de Eyección)
- 8. MATRIZ CUATRIENAL DE METAS, PRODUCTOS MINCIENCIAS E INDICADORES (2027 – 2031)
    - 8.1. Metas de Producción Científica y Tecnológica por Tipología de MinCiencias (Consolidado Macroproyectos 1 y 2)
    - 8.2. Tablero de Indicadores de Gestión, Producto, Resultado e Impacto (2027 – 2031)
- 9. PROGRAMACIÓN PRESUPUESTAL
    - 9.1. Consolidado Presupuestal Plurianual Cuatrienal (Macroproyectos 1 y 2)
- 10. MECANISMOS DE SEGUIMIENTO, EVALUACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE RIESGOS DEL PLAN
    - 10.1. Esquema de Gobernanza y Seguimiento Progresivo

    - 10.2. Matriz de Gestión de Riesgos del Plan Cuatrienal (Incluyendo Riesgos Robóticos y de Simulación)
- 11. ESTRUCTURA TÉCNICA DE COSTE UNITARIO Y AHORRO ESTRATÉGICO
    - 11.1. Costo Unitario por Hora-Banco de Motores (AM37T-20 / AM37T-21)
    - 11.2. Costo Técnico Unitario por Sesión de Entrenamiento en Simulador de Silla de Eyección y Comparativa de Ahorro frente a NASTAR Center (EE. UU.)

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Ficha técnica de identificación y datos generales del Plan de Trabajo Cuatrienal
- Tabla 2. Líneas institucionales de investigación aplicables en la ESUFA
- Tabla 3. Docentes investigadores vinculados al Escuadrón de Investigación (ESINV-ESUFA)
- Tabla 4. Estudiantes y personal en formación vinculable al Semillero INNOVA
- Tabla 5. Laboratorios, talleres y ambientes de investigación disponibles en ESUFA
- Tabla 6. Matriz DOFA Integrada y Estrategias Cruzadas del Escuadrón de Investigación
- Tabla 7. Ficha técnica maestra del Macroproyecto No. 1 (Bancos de Prueba AM37T-20 y AM37T-21)
- Tabla 8. Portafolio de Servicios de Extensión Tecnológica y Académica de los Bancos de Prueba
- Tabla 9. Ficha técnica maestra del Macroproyecto No. 2 (Simulador de Silla de Eyección – Brazo Robótico FANUC)
- Tabla 10. Portafolio de Servicios Operacionales, Académicos y de Extensión del Laboratorio de Simulación de Silla de Eyección ESUFA
- Tabla 11. Matriz Cuatrienal Consolidada de Metas de Producción por Tipología MinCiencias (Macroproyectos 1 y 2)
- Tabla 12. Tablero de Indicadores de Seguimiento Cuatrienal del ESINV-ESUFA (2027–2031)

- Tabla 13. Resumen Financiero Plurianual Proyectado Consolidado del Plan Cuatrienal (COP)
- Tabla 14. Matriz de Identificación, Valoración y Mitigación de Riesgos del Plan de Trabajo Cuatrienal (ESINV-ESUFA)
- Tabla 15. Costo Técnico Unitario por "Hora-Banco Efectiva" en Motores a Reacción y Turbohélice
- Tabla 16. Costo Técnico Unitario y Comparativa de Ahorro Estratégico frente a NASTAR Center (EE. UU.) en el Simulador de Silla de Eyección

1. IDENTIFICACIÓN Y DATOS GENERALES DEL PLAN

Tabla 1

Ficha técnica de identificación y datos generales del Plan de Trabajo Cuatrienal

Parámetro Institucional	**Descripción / Detalle**
Unidad Educativa	Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana "CT. Andrés M. Díaz" (ESUFA).
Escuadrón de Investigación	Escuadrón de Investigación ESUFA (ESINV-ESUFA).
Periodo de Vigencia	Cuatro (4) años.
Fecha de Inicio y Finalización	01 de enero de 2027 – 01 de enero de 2031.
Programas de Educación Superior Articulados	• Tecnología en Gestión de Recursos Aeroespaciales. • Tecnología en Operaciones Aeroespaciales. • Tecnología en Seguridad y Defensa Aeroespacial. • Tecnología en Soporte Aeroespacial.
Dependencias Participantes	Grupo Académico (Escuadrón Educación Superior), y Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación (DICTI).
Responsable de Formulación	Comandante ESINV-ESUFA

Parámetro Institucional	Descripción / Detalle
Responsable de Ejecución	Comandante ESINV, Docentes de Planta y Alumnos Investigadores (Semilleros).
Responsable de Seguimiento y Control	Jefatura de Educación Aeronáutica y Espacial (JEAES) y ESINV.
Fecha de Formulación	_____
Fecha de Aprobación	_____
Acto o Mecanismo de Aprobación	_____
Versión del Documento	001

2. OBJETIVOS DEL PLAN CUATRIENAL (2027 – 2031)

2.1. Objetivo General

Consolidar y escalar, durante el cuatrienio 2027–2031, las capacidades de investigación científica, desarrollo tecnológico, innovación (I+D+i) y formación investigativa del Escuadrón de Investigación de la ESUFA (ESINV-ESUFA), mediante la ejecución articulada de proyectos multianuales alineados con los Programas Estratégicos del Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (SCtEI) al 2042 y el Banco de Necesidades de la FAC; fortaleciendo la sostenibilidad de los grupos GICMA y GIEA ante MinCiencias, la transferencia tecnológica efectiva hacia las unidades logísticas y operativas, el perfil analítico del Suboficial Tecnólogo como solucionador de desafíos técnicos y el aseguramiento de la calidad educativa, en estricta armonía con la programación anual de actividades y la planeación en el Plan Anual de Adquisiciones.

2.2. Objetivos Específicos

- Gobernanza, Estandarización y Trazabilidad Documental Digital: Fortalecer la gobernanza, la normatividad interna y el direccionamiento estratégico del ESINV-ESUFA —en alineación con el Modelo de Investigación del SEFAC (MOINV)— mediante la implementación de un sistema digital centralizado

que estandarice y optimice la gestión, trazabilidad y control documental del ciclo de vida de los proyectos de investigación tecnológica desarrollados en la Escuela.

- Investigación Formativa Transversal: Articular de manera transversal y progresiva las competencias de investigación formativa con los diseños curriculares, Resultados de Aprendizaje (RAE) y perfiles de egreso de los cuatro programas tecnológicos impartidos en la ESUFA, estructurando las opciones de grado alrededor de proyectos institucionales.
- Dinámica y Proyección del Semillero Institucional INNOVA: Consolidar al Semillero INNOVA como el centro de excelencia para la formación científica temprana, el pensamiento crítico, la aplicación de metodologías de Análisis de Causa Raíz (Root Cause Analysis - RCA), el diseño experimental y el relevo generacional para el talento científico y técnico de la FAC, incrementando su participación en redes académicas, pasantías y eventos científicos.
- I+D+i en Sistemas Críticos Aeronáuticos, Propulsión y Superficies: Formular y ejecutar proyectos de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación (niveles TRL 3 a TRL 6) en las líneas de propulsión y biocombustibles aeronáuticos (SAF), nuevos materiales y recubrimientos, mantenimiento predictivo, aviónica/telecomunicaciones, UAVs, logística y seguridad operacional, utilizando los bancos de motores (A/M37T-20/21), hangares y laboratorios para resolver problemas críticos de las Unidades de la FAC.
- Fortalecimiento, Sostenibilidad y Escalamiento de los Grupos GICMA y GIEA: Potenciar la producción científica y garantizar la sostenibilidad en Categoría A (con proyección a Categoría A1) de los grupos institucionales GICMA y GIEA ante MinCiencias, mediante planes de cualificación posgradual continua (maestrías y doctorados), categorización individual de investigadores, protección de horas de dedicación investigativa y auditoría rigurosa en CvLAC y GrupLAC.
- Producción Cualificada, Propiedad Intelectual y Apropiación Social:

Incrementar la tasa de conversión de proyectos y trabajos de grado en artículos publicados en revistas indexadas (Scopus/WoS/Publindex), libros resultados de investigación, prototipos funcionales certificados, manuales técnicos de procedimiento, normas aeronáuticas y registros de propiedad intelectual, fomentando simultáneamente la apropiación social y técnica del conocimiento aeroespacial.

- Articulación Logística y Operacional con CAMAN y CETIA: Orientar los esfuerzos de investigación aplicada hacia las necesidades operacionales y de mantenimiento mayor de la Fuerza, apalancándose en el soporte de pasantías estudiantiles, caracterización e infraestructura provista por el CETIA y la cooperación técnica directa con los talleres del Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN).
- Cooperación Científica y Académica de Alto Nivel (Triple Hélice): Fomentar y expandir alianzas estratégicas, convenios específicos, redes de trabajo y proyectos de co-investigación con Instituciones de Educación Superior acreditadas de alta trayectoria, centros de desarrollo e industria aeronáutica para el apalancamiento de recursos y publicaciones conjuntas.
- Transferencia Tecnológica y Adopción Operativa Certificada: Estandarizar y ejecutar protocolos formales de validación operacional y transferencia tecnológica que garanticen la aplicación práctica, certificada y medible de los resultados, metodologías y prototipos de investigación en las líneas de vuelo, hangares y talleres de mantenimiento de la Institución.
- Soporte al Aseguramiento de la Calidad Educativa: Consolidar un sistema sistemático de seguimiento a indicadores de gestión, producción e impacto en CTeI, generando evidencias verificables y auditables para respaldar los procesos de autoevaluación, renovación de registros calificados y acreditación de alta calidad de los programas tecnológicos y de la ESUFA ante el Ministerio de Educación Nacional y el CNA.

3. MARCO ESTRATÉGICO E INSTITUCIONAL

3.1. Antecedentes del Escuadrón de Investigación

El Escuadrón de Investigación (ESINV) de la Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aerea Colombiana "CT. Andrés M. Díaz" (ESUFA) se instituye como la unidad orgánica, técnica y funcional encargada de planear, dirigir, articular, coordinar y ejecutar los procesos de investigación formativa, investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+i) de la Institución de Educación Superior (IES).

Su arquitectura operacional se enmarca en las directrices estratégicas emitidas por la Jefatura de Educación Aeronáutica y Espacial (JEAES), la coordinación sistémica con la Escuela Militar de Aviación (EMAVI) y los lineamientos de la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación (DICTI), bajo la articulación del Sistema Educativo de la Fuerza Aerea Colombiana (SEFAC).

A través del ESINV, la ESUFA consolida un ecosistema científico-tecnológico que integra la academia técnico-militar con las demandas reales de las unidades aéreas, logísticas y de mantenimiento mayor, operando bajo el modelo de Triple Hélice (Estado – Academia – Industria/Fuerza) establecido en el Modelo de Investigación del SEFAC (MOINV), con el propósito de transformar el conocimiento empírico y técnico de los talleres aeronáuticos en activos de propiedad intelectual, doctrina técnica y soberanía tecnológica para la Nación.

3.2. Marco Normativo y Doctrinal Aplicable

La formulación y ejecución del presente Plan Cuatrienal (2027–2031) se fundamenta y valida en el siguiente cuerpo normativo nacional, sectorial e institucional:

- Decreto 1330 de 2019 (Ministerio de Educación Nacional) y Acuerdo 02 de 2020 (CESU): Marco normativo nacional que regula las condiciones de calidad institucional y de programas para el otorgamiento y renovación de registros calificados, así como los lineamientos de Acreditación en Alta Calidad, exigiendo la articulación demostrable entre las labores formativas, los Resultados de Aprendizaje (RAE) y la producción científica e innovación tecnológica.
- Política de Educación para la Fuerza Pública (PEFuP) 2021–2026: Lineamiento rector ministerial orientado a la modernización educativa del sector defensa, la interdisciplinariedad e integración curricular, la cultura de

autoevaluación y el desarrollo de competencias científicas y analíticas aplicadas a la seguridad y defensa nacional.

- Política de Ciencia, Tecnología e Innovación para el Sector Defensa y Seguridad (MDN, 2024): Marco estratégico sectorial fundamentado en un enfoque de CTeI orientada por misiones y cinco ejes transformadores clave. Orienta el esfuerzo nacional hacia la independencia y soberanía tecnológica, la innovación de uso dual, la reducción de la dependencia extranjera en sistemas de armas y mantenimiento mayor, la protección de bienes intangibles (Propiedad Intelectual) y la focalización en áreas críticas homologadas bajo estándares OTAN (materiales novedosos y fabricación avanzada, propulsión, sistemas autónomos UAV, sensores remotos y tecnologías emergentes de mantenimiento).
- Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (EDAES 2042) y Plan Estratégico para el SCtEI al 2042: Hoja de ruta prospectiva institucional que define las capacidades críticas a desarrollar en los dominios del aire, el espacio y el ciberespacio, la propulsión y los materiales avanzados, estableciendo la maduración progresiva de desarrollos propios mediante la escala de Niveles de Madurez Tecnológica (TRL 1 a TRL 9).
- Manual del Modelo de Investigación del Sistema Educativo de la FAC – MOINV (FAC-6.1.20-O, 2018): Directriz metodológica y procedimental que estandariza la gobernanza del SCtEI, los procesos de gestión, evaluación y seguimiento de los Escuadrones de Investigación en todas las unidades educativas de la Fuerza, las opciones de trabajo de grado, el ciclo de escalamiento industrial de prototipos y la evaluación de propiedad industrial.
- Proyecto Educativo Institucional (PEI ESUFA) y Reglamento de Investigación ESUFA: Marco interno que define y reglamenta los principios, objetivos, alcances y estructura organizacional de la investigación básica, formativa y aplicada en la Escuela, armonizándola con el Modelo Pedagógico Institucional (MOPED FAC).

3.3. Alineación con la Misión y Visión Institucional

El Plan de Trabajo Cuatrienal del ESINV se alinea de forma directa, simbiótica y medible con el direccionamiento superior de la Fuerza Aerea Colombiana (FAC):

3.3.1. Articulación con la Misión Institucional

Misión de la FAC: "Volar, entrenar y combatir para vencer y dominar en el aire, el espacio y el ciberespacio, en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, el orden constitucional y contribuir a los fines del Estado."

El ESINV soporta materialmente el imperativo misional mediante la ejecución de proyectos de investigación aplicada y desarrollo experimental orientados a garantizar la disponibilidad de flota, la confiabilidad aeronáutica, la eficiencia logística y la soberanía tecnológica en los sistemas de soporte de la Fuerza.

el ESINV gestiona el desarrollo de soluciones técnicas endógenas tanto a nivel de investigación formativa como aplicada.

3.3.2. Articulación con la Visión Institucional

Visión de la FAC: "Para ejercer el dominio en el aire, el espacio y el ciberespacio, la Fuerza Aeroespacial será innovadora, polivalente, interoperable, líder y preferente regional, con alcance global y con capacidades disuasivas reales, permanentes y sostenibles."

El ESINV materializa los atributos de una Fuerza "innovadora, polivalente e interoperable" fomentando una cultura de innovación técnica y pensamiento crítico desde la base formativa de los futuros suboficiales.

Lo que permite que la ESUFA entregue a la Institución tecnólogos con las competencias necesarias requeridas desde los diferentes campos de desempeño laboral.

3.4. Articulación con los Objetivos Estratégicos de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

El ESINV se articula con el Plan Estratégico Institucional de la FAC, operacionalizando sus objetivos estratégicos a través de la investigación formativa (semilleros y trabajos de grado) y la investigación aplicada de nivel tecnológico:

1. Objetivo: Consolidar el Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (SCtEI) institucional. El ESINV nutre la base piramidal y el núcleo intermedio del SCtEI desde la formación del suboficial.

Para ello, canaliza su producción mediante los grupos de investigación institucionales GICMA y GIEA, mantiene activo el semillero INNOVA y estructura proyectos aplicados con niveles de madurez tecnológica TRL 3 a TRL 6 que dan solución a necesidades reales de las unidades aéreas.

Asimismo, registra y reporta sistemáticamente activos de Nuevo Conocimiento, Desarrollo Tecnológico e Innovación en los aplicativos CvLAC y GrupLAC de la plataforma ScienTI, contribuyendo al avance de la FAC hacia la autonomía tecnológica.

2. Objetivo: Fortalecer la doctrina y la gestión del conocimiento. Bajo los parámetros del MOINV, el ESINV convierte los resultados de investigación de la Escuela y el conocimiento tácito acumulado en los talleres en conocimiento explícito, codificado y reutilizable.

   Los resultados de los proyectos se traducen en boletines técnicos, guías de inspección, protocolos de ensayo en bancos de motores, manuales de procedimiento logístico y documentos académicos que se alojan en el repositorio institucional de la Escuela para consulta y apropiación por cualquier miembro de la Institución.
3. Objetivo: Incorporar, fidelizar y promover el desarrollo y desempeño del talento humano. Siendo el objetivo donde la ESUFA ejerce mayor impacto por su naturaleza formativa, el ESINV interviene en la dimensión intelectual y operacional, desarrollando competencias investigativas y analíticas en el personal de alumnos mediante semilleros y trabajos de grado orientados a problemas reales de la FAC.

   Paralelamente, cualifica a docentes e investigadores militares y civiles con rutas de formación posgradual (maestrías y doctorados), perfilamiento investigativo y acompañamiento metodológico, consolidando una masa crítica de talento humano competente, categorizado y motivado.
4. Objetivo: Sostener, preservar y proteger el poder aéreo, espacial y ciberespacial. El ESINV apoya la sostenibilidad de las capacidades estratégicas de la FAC desde las áreas técnicas de los programas tecnológicos de la ESUFA. Mediante proyectos en líneas específicas de investigación institucionales, para generar mejoras a procesos, que aportan a la autonomía logística con soluciones aplicables a las necesidades funcionales y operativas de la Fuerza.

5. Objetivo: Fortalecer el desempeño institucional y las relaciones estratégicas. El ESINV gestiona la investigación de forma planificada, trazable y medible mediante la sincronización entre el Plan Anual de Actividades, el Plan Anual de Adquisiciones (PAA) e indicadores CTeI.

   Asimismo, expande la capacidad instalada de la Escuela mediante el trabajo colaborativo y convenios específicos con otras instituciones Académicas, centros de desarrollo tecnológico (CETIA) y entidades del sector, fortaleciendo la visibilidad y relación de la Escuela con el entorno nacional.

3.5. Articulación con las Instancias Rectoras del SEFAC y del SCtEI

3.5.1. Articulación con la Jefatura de Educación Aeronáutica y Espacial (JEAES)

El ESINV desarrolla su gestión en subordinación funcional y articulación estratégica con la JEAES bajo cinco condiciones operativas:

- Supervisión, gobernanza y control: La JEAES ejerce la supervisión y el seguimiento de la gestión investigativa de la ESUFA; el ESINV reporta periódicamente el avance físico, presupuestal y técnico de su matriz cuatrienal, indicadores y resultados, atendiendo sus auditorías académicas y lineamientos.
- Alineación curricular y pedagógica (MOPED FAC): La JEAES orienta la coherencia entre la investigación formativa y los currículos de los programas de educación superior. El ESINV ajusta líneas de investigación, proyectos integradores, semilleros y trabajos de grado a los perfiles de egreso y lineamientos académicos solicitados.
- Aseguramiento de la calidad educativa (SIACE): El ESINV genera, sistematiza y conserva las evidencias documentales y estadísticas de investigación exigidas por las directrices de JEAES, con base en la Política de Educación para la Fuerza Pública (PEFuP) y los factores de calidad vigentes del MEN y el CNA.
- Enlace sistémico e inter-escuelas (Red SEFAC): La JEAES actúa como enlace estratégico entre el ESINV, las demás escuelas de formación/capacitación (EMAVI, EPFAC) y las instancias del SCtEI, asegurando que los proyectos y productos del Escuadrón respondan a las

necesidades institucionales y al Plan Estratégico de CTeI.

- Planeación presupuestal y gestión de recursos (PAA): El ESINV estructura, sustenta y presenta en su programación anual el anteproyecto de presupuesto y necesidades de equipamiento científico-tecnológico, en coordinación con los lineamientos emitidos por la JEAES.

3.5.2. Articulación con la Dirección de Formación Aeroespacial (DIFOA)

El ESINV se articula con la DIFOA para asegurar que la actividad investigativa fortalezca directamente la excelencia del proceso enseñanza-aprendizaje:

- Coherencia con los Resultados de Aprendizaje (RAE) y perfiles de egreso: El ESINV alinea sus líneas de investigación, semilleros y trabajos de grado con los perfiles de egreso, competencias específicas y RAE que la DIFOA define para la formación integral del personal de suboficiales tecnólogos.
- Despliegue de la investigación formativa transversal: El ESINV desarrolla la investigación formativa de manera gradual a lo largo de los niveles de formación (observación técnica, formulación de problemas, diseño metodológico, experimentación en taller y análisis de datos) como parte intrínseca de los procesos de enseñanza y aprendizaje establecidos por la DIFOA.
- Pertinencia operativa y retroalimentación curricular: El ESINV selecciona temáticas de trabajos de grado y pasantías técnicas en el semillero de investigación INNOVA, a partir de las necesidades de formación y competencias requeridas en las unidades operativas.
- Seguimiento y evidencias para Registro Calificado y Acreditación: El ESINV reportA, en los plazos determinados, los resultados consolidados de la investigación formativa (trabajos de grado, tasas de graduación por modalidad investigativa, participación estudiantil en el semillero INNOVA y productos asociados), soportando los procesos de registro calificado, acreditación y mejoramiento continuo.

3.5.3. Articulación con la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación (DICTI)

El ESINV opera como el brazo ejecutor tecnológico de la DICTI en la ESUFA, articulándose en cinco frentes técnicos:

- Pertinencia operativa y validación en el Banco de Necesidades: El ESINV somete sus proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico al aval y orientación técnica de la DICTI, verificando que respondan a problemáticas reales registradas en el Banco de Problemas y Necesidades de CTeI de la Fuerza y evitando la duplicidad de esfuerzos.
- Alineación con el Plan Estratégico de CTeI 2042 y Política Sectorial 2024: El ESINV estructura sus líneas de investigación, proyectos y metas bajo la metodología de maduración tecnológica (TRL), en estricta concordancia con los Programas Estratégicos del Plan Estratégico de CTeI de la FAC y la Política de CTeI del Sector Defensa y Seguridad 2024.
- Gestión de capacidades, gobernanza de grupos y categorización ante MinCiencias: El ESINV coordina con la DICTI el fortalecimiento y escalamiento de sus grupos (GICMA y GIEA) y la progresión de sus investigadores (Junior, Asociado, Senior) ante MinCiencias, garantizando el registro y actualización rigurosa de la información en las plataformas CvLAC y GrupLAC según el Modelo de Medición vigente.
- Propiedad intelectual, transferencia y apropiación de resultados: Siguiendo los procedimientos del MOINV, el ESINV entrega a la DICTI los productos y resultados susceptibles de protección intelectual (patentes, modelos de utilidad, diseños industriales, software o secretos empresariales), apropiación y transferencia, facilitando su adopción certificada por parte de las unidades operativas y logísticas de la FAC.
- Cooperación científica y ecosistema de innovación: El ESINV adelanta alianzas estratégicas y convenios con universidades, centros de investigación (CETIA), con el fin de apalancar recursos externos, ampliar capacidades experimentales y potenciar la visibilidad nacional e internacional de sus resultados.

3.6. Inserción Sistémica en el SCtEI y Articulación con los Programas de Educación Superior

El ESINV-ESUFA se encuentra formal, orgánica y funcionalmente adscrito al Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (SCtEI) de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, operando como un nodo académico, técnico y científico fundamental dentro de la arquitectura de investigación de la Institución.

Conforme a las directrices del Subsistema Educativo y de Ciencia y Tecnología de la Fuerza, esta relación se estructura y materializa a través de los siguientes ejes sistémicos:

- Adscripción y Aportes a los Programas Misionales Estratégicos: El ESINV orienta la formulación y ejecución de su portafolio de proyectos bajo los dos programas rectores definidos en el SCtEI institucional:
    - Programa de Apoyo a la Misión: Enfocado en el desarrollo de soluciones aplicadas a la seguridad operacional (SMS), la gestión de factores humanos, la seguridad aeroportuaria, la optimización de los procesos logísticos, las tecnologías de la información aplicadas a la educación, el perfeccionamiento de la administración del talento humano, la doctrina aeroespacial y el estudio de nuevos materiales aeroespaciales.
    - Programa de Desarrollo Aeronáutico: Orientado a la investigación aplicada y desarrollo experimental en plataformas no tripuladas (UAVs y defensa antiaérea), el diseño y soporte de sistemas logísticos de combustibles fósiles, biocombustibles (SAF), grasas y lubricantes sostenibles, tecnologías emergentes en comunicaciones y telemetría, así como mantenimiento predictivo y monitoreo remoto.
- Sintonía con la Hoja de Ruta Institucional al 2042 y la Política de Defensa: La gestión del Escuadrón concuerda plenamente con el Plan Estratégico para el SCtEI de la Fuerza Aeroespacial Colombiana al 2042 y con los lineamientos de la Política de Ciencia, Tecnología e Innovación para el Sector Defensa y Seguridad 2024.

Desde esta perspectiva, el ESINV contribuye activamente al cumplimiento de las metas institucionales de desarrollo de capacidades críticas, soberanía tecnológica, innovación dual y reducción de la dependencia extranjera en el mantenimiento de sistemas aeronáuticos y flotas de la Fuerza.

- Integración en Red con los Actores del Ecosistema Institucional y Externo: Como parte activa del SCtEI, el ESINV actúa como un puente articulador entre la academia y la operación militar.

  A través de la participación de sus docentes en los grupos GICMA y GIEA (ambos en Categoría A de MinCiencias), el impulso metodológico del semillero INNOVA, el soporte instrumental del CETIA y la cooperación técnica directa con el Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN), el Escuadrón participa en comités técnicos, convocatorias internas de cofinanciación y redes de conocimiento sectorial, garantizando que la producción científica responda con precisión a los requerimientos tecnológicos y planes de modernización de la FAC.
- Articulación Curricular con los Programas de Educación Superior de la ESUFA: Los proyectos de investigación se vinculan directamente con los núcleos problémicos y perfiles de egreso de los cuatro programas tecnológicos:
    1. Tecnología en Soporte Aeroespacial (incluyendo Mantenimiento y Abastecimientos Aeronáuticos): Articulada con las líneas de Nuevos Materiales Aeroespaciales (1.8.1), Mantenimiento Predictivo (2.4.1), Monitoreo Remoto (2.4.2), Sistemas y Operaciones Logísticas (1.3) y Diseño de soporte logístico para combustibles fósiles, biocombustibles, grasas y lubricantes sostenibles (2.2.1), enfocándose en la integridad termomecánica de motores (J69, PT6), análisis de fallas metalúrgicas, recubrimientos protectores y cadena de suministro.
    2. Tecnología en Operaciones Aeroespaciales (incluyendo Electrónica, Comunicaciones e Inteligencia Aeronáutica): Articulada con las líneas de UAVs, Modelos de Programación y Defensa Antiaérea (2.1), Telemetría de datos aeronáuticos (2.3.1), Protocolos de transmisión de enlace (2.3.2) y Sistemas de

Información Geográfica / Sensores Remotos (2.3.3), centrándose en aviónica, guerra electrónica, radionavegación e integración de plataformas no tripadas.

3. Tecnología en Seguridad y Defensa Aeroespacial (incluyendo Seguridad Aeroportuaria): Articulada con los subprogramas de Seguridad Operacional (1.1: Factores Humanos, Gestión SMS e Investigación de Accidentes), Gestión Administrativa en Seguridad Aeroportuaria (1.2: Gestión de Riesgos, Nuevas Tecnologías de Seguridad, Manejo de Crisis y Análisis de Datos) y Sistematización de Drones para Defensa Antiaérea (2.1.3).
4. Tecnología en Gestión de Recursos Aeroespaciales: Articulada transversalmente con Gestión Logística (1.3), Administración y Desarrollo del Talento Humano (1.4), Gestión Tecnológica e Innovación (1.5), Doctrina Militar Aeroespacial y Organizacional (1.6) y Educación y TICs (1.7).

Tabla 2

Líneas institucionales de investigación aplicables en la ESUFA

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ESUFA		
PROGRAMA ESTRATÉGICO	SUBPROGRAMA	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
APOYO A LA MISIÓN	1.1 SEGURIDAD OPERACIONAL	1.1.1 Factores Humanos
		1.1.2 Gestión de la Seguridad Operacional
		1.1.3 Investigación de Accidentes
		1.2.1 Gestión de Riesgos

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ESUFA		
	1.2 GESTIÓN ADMINISTRATIVA EN SEGURIDAD AEROPORTUARIA	1.2.2 Desarrollo e Implementación de Nuevas Tecnologías de Seguridad
		1.2.3 Gestión y Manejo de Crisis
		1.2.4 Gestión de Datos y Análisis
	1.3 GESTIÓN LOGÍSTICA	1.3.1 Sistemas Logísticos
		1.3.2 Operaciones Logísticas
	1.4 ADMINISTRACIÓN Y DESARROLLO DEL TALENTO HUMANO	1.4.1 Gestión y Desarrollo del Talento Humano
		1.4.2 Gestión y Administración Organizacional
	1.5 GESTIÓN TECNOLÓGICA E INNOVACIÓN	1.5.1 Gestión tecnológica e Innovación
	1.6 DOCTRINA	1.6.1 Doctrina Militar Aeroespacial
		1.6.2 Doctrina organizacional y procesos de apoyo
	1.7 EDUCACIÓN Y TICS	1.7.1 Educación y TICs aplicadas a la educación
	1.8 MATERIALES AEROESPACIALES	1.8.1 Nuevos Materiales aeroespaciales
DESARROLLO AERONÁUTICO	2.1 UAVs	2.1.1 Drones, RPA, UAV.
		2.1.2 Modelos De Programación Para UAV

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ESUFA		
		2.1.3 Sistematización De Drones Para Aplicaciones De Defensa Antiaérea
	2.2 SUFICIENCIA INSTITUCIONAL, DE SISTEMAS LOGÍSTICOS E INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES	2.2.1 Diseño de soporte logístico para el suministro de Combustibles fósiles, Biocombustibles, grasas y lubricantes sostenible
		2.2.2 Construcción normativa logística para suministros y repuestos aeronáutico
	2.3 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN COMUNICACIONES	2.3.1 Telemetría de datos aeronáuticos
		2.3.2 Protocolos de trasmisión de enlace aeronáutico
		2.3.3 Sistemas de Información Geográfica / Sensores Remotos
	2.4 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN MANTENIMIENTO AERONÁUTICO	2.4.1 Mantenimiento predictivo
		2.4.2 Monitoreo remoto

3.7. Capacidades de Investigación Asignadas al Escuadrón

Para cumplir su mandato institucional durante el cuatrienio 2027–2031, el ESINV despliega cinco capacidades medulares orientadas a la ejecución de proyectos aplicados, el fomento de la cultura científica, la administración de semilleros y la transferencia de soluciones técnicas a las unidades logísticas:

1. Capacidad de Formación Investigativa y Gestión de Semilleros: Potestad metodológica, pedagógica y organizativa para identificar, reclutar, formar y consolidar talento humano temprano (estudiantes y docentes), promoviendo la cultura científica, la rigurosidad del método experimental, el pensamiento

crítico, la investigación formativa y la articulación armónica del Semillero INNOVA con los semilleros institucionales y redes nacionales de investigación.

2. Capacidad de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico Experimental: Habilidad institucional para formular, desarrollar y ejecutar proyectos de investigación aplicada orientados a dar solución a los problemas técnicos, operativos y logísticos de la FAC, en estricta concordancia con las líneas institucionales de investigación, llevando las iniciativas desde niveles conceptuales (TRL 2–3), y en algunos casos, supeditado a asignación de recursos, desarrollo experimental en bancos de ensayo y entornos relevantes (TRL 4–6).
3. Capacidad de Innovación y Resolución de Desafíos Técnicos Operacionales: Competencia institucional especializada para diseñar, validar y desarrollar soluciones prácticas de taller, prototipos funcionales, bancos didácticos e instrumentales, manuales de procedimiento, guías de inspección, mejoras metodológicas y herramientas de apoyo técnico que mitiguen la obsolescencia tecnológica y fortalezcan las capacidades operativas y de mantenimiento de las unidades de la FAC.
4. Capacidad de Transferencia, Apropiación y Asistencia Tecnológica a Nivel Institucional: Ecosistema operativo y metodológico para empaquetar, validar, canalizar y transferir los resultados de investigación y desarrollos tecnológicos hacia las dependencias, talleres, talleres y unidades logísticas de la FAC, respondiendo de manera directa y efectiva a las necesidades institucionales del servicio.
5. Capacidad de Gobernanza, Gestión Documental, Trazabilidad y Aseguramiento de la Calidad en CTeI: Estructura administrativa y digital encargada de mantener la trazabilidad integral del ciclo de vida de los proyectos de investigación, auditar y actualizar permanentemente los registros institucionales en la plataforma ScienTI (CvLAC y GrupLAC) ante MinCiencias, y suministrar evidencias verificables para el sistema SIACE, los procesos de autoevaluación, renovación de registros calificados y

acreditación de alta calidad.

3.8. Relación con Grupos, Semilleros, Centros y demás Actores de Investigación

El ESINV articula su gestión científica, tecnológica y formativa mediante una red integrada de actores internos y externos bajo el modelo de Triple Hélice, la cual dinamiza los procesos de investigación formativa, aplicada, desarrollo tecnológico y apropiación del conocimiento de la siguiente manera:

- Grupos de Investigación Institucionales (Registrados y Categorizados en MinCiencias):
    - GICMA (Categoría A): Enfocado en Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas, estudios estratégicos, seguridad operacional, factores humanos, logística aeronáutica, administración del talento humano, doctrina aeroespacial y educación militar.
    - GIEA (Categoría A): Enfocado en Desarrollo de líneas en Ciencias y Tecnologías Aeroespaciales, propulsión y termodinámica de turbinas, biocombustibles aeronáuticos (SAF), materiales avanzados y recubrimientos, mantenimiento predictivo, electrónica, telecomunicaciones y sistemas no tripulados (UAV).
    - El ESINV canaliza la participación de sus docentes investigadores de planta (militares y civiles) y de tiempo parcial a través de estos dos grupos institucionales, garantizando la producción bibliográfica, la formulación de proyectos concursables y la permanente actualización de perfiles en el CvLAC y GrupLAC ante MinCiencias.

- Semilleros de Investigación (Semillero INNOVA): Constituye la principal fuente de formación investigativa temprana para los alumnos de los diferentes programas tecnológicos de la ESUFA.

  Organizado por nodos temáticos afines a las tecnologías, a través de INNOVA los alumnos desarrollan competencias en formulación de proyectos, análisis de causa raíz y divulgación científica en encuentros nacionales e internacionales.
- Centros de Apoyo Tecnológico y Unidades Logísticas Aliadas:

    - CETIA (Centro de Desarrollo Tecnológico de Investigación Aeronáutica): Funciona como un soporte estratégico e instrumental de alto valor para la Escuela. El CETIA facilita y acoge la realización de pasantías técnicas de investigación para los estudiantes integrantes del semillero INNOVA, brindando infraestructura especializada e instrumental técnico que potencia el desarrollo, caracterización y validación de los trabajos y proyectos de grado.
    - Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN): Actúa como el principal laboratorio vivo y usuario final de los desarrollos tecnológicos de ESUFA. La sinergia geográfica y funcional entre ESUFA y CAMAN, permite estudiar componentes aeronáuticos dados de baja para análisis de falla, procesos en talleres y ejecutar una transferencia tecnológica directa.
- Articulación Académica Nacional: El Escuadrón consolida redes de trabajo colaborativo y alianzas estratégicas con Instituciones de Educación Superior (IES) acreditadas de alta trayectoria, tales como la Universidad de los Andes y la Universidad ECCI, fomentando el intercambio de saberes especializados, el acceso cruzado a laboratorios de alta complejidad, la co-investigación, la movilidad académica, talleres interinstitucionales de creación y la asesoría metodológica de alto nivel para la coautoría en publicaciones indexadas en Scopus y Web of Science (WoS).

4. DIAGNÓSTICO DE CAPACIDADES

4.1. Estado Actual del Escuadrón de Investigación

El ESINV-ESUFA se encuentra en una fase estratégica de consolidación y maduración estructural, transitando decididamente desde un modelo operativo tradicional, basado en iniciativas independientes y trabajos de grado aislados concebidos únicamente como requisito académico de titulación, hacia un esquema de gestión cuatrienal planificado, alineado con el ciclo de planeación de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

El diagnóstico actual refleja fortalezas diferenciadoras únicas en el sector educativo tecnológico del país: una sólida base de infraestructura real de talleres aeronáuticos y bancos de ensayo de motores a reacción y turbohélice, el respaldo

de dos grupos de investigación en Categoría A de MinCiencias (GICMA y GIEA), una planta docente con profunda trayectoria técnica y académica, y una alta motivación y disciplina del talento humano estudiantil vinculado al semillero INNOVA.

No obstante, para asegurar la sostenibilidad en el cuatrienio 2027–2031, el Escuadrón requiere un impulso decidido en la estandarización de procesos de medición ante MinCiencias, el incremento en la tasa de conversión de trabajos de grado en producción bibliográfica indexada (Q1–Q4) y desarrollos tecnológicos, la renovación instrumental de laboratorios, la sistematización digital de evidencias y la optimización y protección efectiva de los tiempos de dedicación de los investigadores.

4.2. Capacidades Científicas y Tecnológicas Disponibles

La ESUFA dispone de una capacidad instalada físico-instrumental que le permite ejecutar investigación experimental y validación tecnológica hasta niveles TRL 5 y TRL 6:

- Infraestructura especializada de ciencias básicas y aplicadas: Laboratorios de Física, Electricidad, Electrónica Analógica y Digital, Telecomunicaciones, Microprocesadores.

- Hangares de instrucción y desarrollo tecnológico aeronáutico: Hangares para el desarrollo de prácticas estándar y experimentales en mantenimiento y soporte logístico, dotados con maquetas de aeronaves funcionales, sistemas hidráulicos, neumáticos, trenes de aterrizaje, estructuras metálicas, materiales compuestos y aviónica.
- Plataformas de prueba termodinámica y bancos de ensayo: Disponibilidad estratégica de los bancos de prueba de motores aeronáuticos (tipo A/M37T-20 y A/M37T-21) instrumentados para el estudio termodinámico, evaluación funcional, análisis de emisiones, vibraciones y desempeño energético de turbinas de gas a reacción (Teledyne CAE J69) y motores turbohélice (Pratt & Whitney PT6), constituyendo una plataforma idónea para la investigación en mezclas de biocombustibles aeronáuticos (SAF) y diagnóstico predictivo.
- Ambientes de simulación operacional: Simulador de Tránsito Aéreo y entornos de comunicaciones aeronáuticas para prácticas funcionales,

estudios de factores humanos, carga cognitiva y gestión de seguridad operacional (SMS).

4.3. Talento Humano Disponible y Formación del Personal Investigador

4.3.1. Descripción Cualitativa y Cuantitativa del Talento Humano Disponible

El ESINV cuenta con un núcleo base consolidado de trece (13) docentes investigadores vinculados formalmente con registro activo en la plataforma ScienTI (CvLAC) de MinCiencias, distribuidos estratégicamente entre los dos grupos institucionales: cinco (5) investigadores adscritos al grupo GICMA (38,5%) y ocho (8) investigadores adscritos al grupo GIEA (61,5%). Este cuerpo investigativo presenta una composición mixta e interdisciplinaria que integra Oficiales (Grado Mayor), Suboficiales de alta jerarquía en retiro/reserva activa (Técnicos Jefes y Técnicos Subjefes) y un sólido equipo de Docentes Civiles de Planta del Ministerio de Defensa (categorías OD9 a OD18), lo que permite equilibrar la movilidad operativa propia de la carrera militar con la estabilidad, continuidad metodológica y memoria institucional del personal civil de planta.

4.3.2. Formación Académica y Experiencia Técnica del Personal Investigador

El perfil de cualificación académica del equipo investigador refleja un alto estándar para el nivel de formación tecnológica: el 76,9% de los investigadores cuenta con formación posgradual avanzada, distribuida en un 7,7% con título de Doctorado (Ph.D.) (1 investigador), un 69,2% con título de Maestría (M.Sc. / Magíster) (9 investigadores), un 15,4% con formación profesional de Pregrado (2 investigadores) y un 7,7% con formación Tecnológica especializada (1 investigador). A esta solvencia académica se suma una trayectoria técnica acumulada superior a dos décadas promedio en mantenimiento aeronáutico en línea y de depósito, química industrial y tratamientos superficiales, ingeniería mecánica y electrónica, logística aeronáutica, seguridad operacional y docencia universitaria en el SEFAC, otorgando al ESINV una capacidad idónea para dirigir proyectos aplicados de alta complejidad técnica.

Tabla 3

Docentes investigadores vinculados al Escuadrón de Investigación (ESINV-ESUFA)

GRADO	NOMBRE	GRUPO INVESTIGACIÓN	NIVEL FORMACIÓN	CÓDIGO REGISTRO CvLAC (ScienTI)
MY	William Alexander Luz Cárdenas	GICMA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000025738
OD18	Víctor Miguel Quintero Patiño	GICMA	DOCTORADO	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001652558
OD15	Eliana Geraldine Gómez Bonilla	GICMA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001753019
OD15	Oro de Ofir García González	GICMA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001556254
TJ®	Diana María Velasco Marín	GICMA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001728767
MY	Leonardo Augusto Mora Salazar	GIEA	PREGRADO	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001025945
OD16	Magda Marisol Romero Parra	GIEA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001609334
OD15	Daniel Alberto Arteaga Puentes	GIEA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001565057
OD15	Iván Gustavo Peña Rincón	GIEA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001379748

GRADO	NOMBRE	GRUPO INVESTIGACIÓN	NIVEL FORMACIÓN	CÓDIGO REGISTRO CvLAC (ScienTI)
OD15	Renso Mardu Molano Pulido	GIEA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001556788
OD13	Víctor Manuel Castañeda Trujillo	GIEA	PREGRADO	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002003336
OD9	Luis Armando Ariza Ariza	GIEA	TECNOLÓGICO	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002036533
TS®	Juan David Pava	GIEA	MAESTRÍA	https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001559656

Tabla 4

Estudiantes y personal en formación vinculable al Semillero INNOVA

Programa Académico	Semillero	Número Estimado de Alumnos	Línea de Investigación
Tecnología Mantenimiento Aeronáutico	INNOVA	27	Soporte logístico para el suministro de Biocombustibles / Gestión tecnológica e Innovación
Tecnología Electrónica Aeronáutica		4	Gestión tecnológica e Innovación
Tecnología Inteligencia Aeronáutica		4	Gestión tecnológica e Innovación
Tecnología Seguridad Aeroportuaria		6	Gestión tecnológica e Innovación

Programa Académico	Semillero	Número Estimado de Alumnos	Línea de Investigación
Tecnología Seguridad Aeroportuaria		5	Gestión tecnológica e Innovación
Tecnología Abastecimientos Aeronáuticos		6	Gestión tecnológica e Innovación

Tabla 5

Laboratorios, talleres y ambientes de investigación disponibles en ESUFA

Nombre del Laboratorio / Taller	Capacidad / Equipamiento Principal	Uso en Investigación
Laboratorio Banco Pruebas Motores Aeronáuticos	Desarrollo prácticas estándar y ensayos funcionales Motores Turbohélice y a Reacción	Semillero de Investigación, Proyectos de Investigación Aplicada
Hangares de Mantenimiento	Maquetas de Aeronaves Completas	Prácticas experimentales, Trabajos de Grado y Prototipado
Simulador Tránsito Aéreo	Prácticas funcionales Comunicaciones y Control de Tránsito Aéreo	Pasantías Técnicas, Trabajos de Grado

4.4. Recursos Bibliográficos, Normativos y Bases de Datos

El ecosistema investigativo se soporta en el acceso institucional al Sistema de Bibliotecas de la FAC, plataformas virtuales especializadas, bases de datos científicas internacionales multidisciplinarias y de ingeniería (IEEE Xplore, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis), compendios de normativas técnicas aeronáuticas y de ensayos estandarizados (Mil-Specs, FAA, EASA, ASTM, RAC y manuales técnicos de fabricantes OEM), y el repositorio histórico de trabajos de grado y producción doctrinal de la FAC.

4.5. Necesidades y Brechas Identificadas

A partir de la autoevaluación de capacidades frente a los retos del Plan Estratégico del SCtEI al 2042, se identifican seis brechas estructurales con sus respectivos requerimientos de intervención:

1. Equipos, Instrumentación y Herramientas Computacionales:
    - Brecha: Limitación para el desarrollo de actividades investigativas avanzadas debido al desfase tecnológico parcial u obsolescencia en sistemas de adquisición de datos (DAQ), sensores de alta precisión en bancos de motores, equipos de caracterización fisicoquímica y ensayos no destructivos (END), así como carencia de licencias renovadas de software especializado (FEA, CFD, CAD paramétrico y análisis estadístico).
    - Necesidad: Adquisición y modernización progresiva en el Plan Anual de Adquisiciones (PAA) 2027–2031 de equipos de medición, instrumentación de bancos de motores (A/M37T-20/21), herramientas y licencias de software científico, para fortalecer el modelado numérico y la experimentación aplicada en los talleres y laboratorios de la Escuela.
2. Infraestructura Física y Segregación de Ambientes de Práctica:
    - Brecha: Espacios físicos compartidos y no diferenciados entre las actividades de instrucción masiva regular de los talleres aeronáuticos y el desarrollo de montajes experimentales del personal investigador y alumnos, lo que obliga al desmontaje frecuente de pruebas y limita los tiempos de trabajo continuo y la repetibilidad experimental.
    - Necesidad: Optimización, adecuación y dotación exclusiva de áreas o células específicas de I+D+i dentro de los talleres y laboratorios para albergar de manera permanente y bajo control metrológico los proyectos en desarrollo y pasantías técnicas del semillero INNOVA.

3. Disponibilidad y Protección de la Intensidad Horaria para la Investigación:
    - Brecha: Carga académica de aula, instrucción práctica en taller y responsabilidades administrativas transversales, asignadas al personal de docentes de planta (militares y civiles), lo que restringe los espacios de dedicación exclusiva para la experimentación, la

formulación de proyectos concursables, la asesoría de trabajos de grado y la redacción de artículos científicos de alto impacto.

- Necesidad: Establecer mecanismos institucionales y de gestión académica que permitan flexibilizar, proteger y reconocer formalmente horas de dedicación investigativa en la asignación horaria semanal de los docentes instructores adscritos al ESINV, sujetas a compromisos verificables de producción CTeI.

4. Bibliografía Especializada y Acceso a Normativa Técnica Aeronáutica Vigente:
    - Brecha: Acceso limitado o discontinuo a suscripciones de normativas técnicas internacionales sujetas a revisión anual (estándares aeroespaciales FAA, EASA, normas ASTM, SAE/AMS, Nadcap, ISO/IEC 17025 y especificaciones militares MIL-STD) y a literatura científica de acceso cerrado.
    - Necesidad: Ampliación de la cobertura presupuestal y de los convenios bibliográficos interinstitucionales para garantizar que docentes y alumnos investigadores cuenten con fuentes documentales y normas técnicas primarias actualizadas del sector aeronáutico nacional e internacional.
5. Formación Posgradual Avanzada (Nivel Doctoral) y Cualificación del Talento Humano:
    - Brecha: Aunque se cuenta con una sólida base de magísteres (69,2%), solo un (1) investigador posee título de Doctorado (7,7%), lo que requiere incrementar el porcentaje de docentes de planta con formación doctoral en áreas de ingeniería, ciencias militares y tecnología aeronáutica para sostener o escalar las máximas categorías (A y A1) ante MinCiencias, además de preparar relevos frente a la rotación militar.
    - Necesidad: Fomentar y estructurar un plan de becas, comisiones de estudios y alianzas de cualificación avanzada (articuladas con JEAES, MinCiencias, ICETEX e instituciones académicas aliadas)

para el personal de instructores militares y civiles de la Escuela.

6. Trazabilidad Documental y Gobernanza Digital de Datos en CTeI:
    - Brecha: Procesos de recolección de evidencias de semilleros, bases de datos experimentales, actas de seguimiento y soportes de productos de investigación que en ocasiones presentan dispersión administrativa o requieren mayor automatización.
    - Necesidad: Consolidar un Sistema Integrado de Gestión Documental y Trazabilidad Digital centralizado para el ESINV, facilitando la custodia del ciclo de vida de cada proyecto, el seguimiento automatizado a indicadores, y la auditoría y actualización en tiempo real de CvLAC y GrupLAC ante MinCiencias.

4.6. Análisis Estratégico DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas)

Con el propósito de estructurar estrategias gerenciales efectivas para el cuatrienio 2027–2031, a continuación, se presenta la Matriz DOFA Integrada y Cruzada del Escuadrón de Investigación (ESINV-ESUFA), condensando los factores internos y externos identificados en el diagnóstico institucional:

Tabla 6

Matriz DOFA Integrada y Estrategias Cruzadas del Escuadrón de Investigación (ESINV-ESUFA)

MATRIZ DOFA INTEGRADA — ESCUADRÓN DE INVESTIGACIÓN (ESINV-ESUFA) 2027–2031		
EJE DE ANÁLISIS / ENTORNO	FORTALEZAS (F) (Factores Internos Positivos)	DEBILIDADES (D) (Factores Internos Negativos o Brechas)
FACTORES INTERNOS (Capacidad instalada y gestión directa del ESINV / ESUFA)	F1. Experiencia Operativa y Académica: Profunda trayectoria técnica y aeronáutica del personal docente investigador militar y civil (76,9% con posgrado). F2. Infraestructura Base Real: Disponibilidad de talleres especializados, hangares con aeronaves funcionales y simulador de tránsito aéreo.	D1. Baja Tasa de Publicación Indexada: Limitación en la conversión de trabajos de grado en artículos científicos publicados en revistas de alto impacto (Q1–Q4) y patentes. D2. Rotación del Personal Militar: Relevo periódico por necesidades del servicio que puede afectar la continuidad de líneas multianuales.

MATRIZ DOFA INTEGRADA — ESCUADRÓN DE INVESTIGACIÓN (ESINV-ESUFA) 2027–2031		
	F3. Bancos de Ensayo de Motores: Plataformas reales A/M37T-20 y A/M37T-21 operativas para turbinas J69 y PT6. F4. Cultura de Semilleros: Alto nivel de motivación, disciplina y volumen estudiantil en el Semillero INNOVA. F5. Respaldo y Categorización ScienTI: Dos grupos institucionales (GICMA y GIEA) categorizados en Categoría A de MinCiencias.	D3. Financiación Interna y Equipos: Restricción de rubros propios y obsolescencia parcial en instrumentación de captura de datos y licencias de software. D4. Carga Académica y Administrativa: Exceso de horas de instrucción y gestión que comprime el tiempo efectivo de investigación docente. D5. Dispersión Documental y Espacios: Uso compartido de talleres entre docencia e investigación y dispersión en la trazabilidad de evidencias.
OPORTUNIDADES (O) (Factores Externos Positivos)	ESTRATEGIAS FO (Max – Max) Ofensivas de Crecimiento	ESTRATEGIAS DO (Min – Max) Reorientación y Apalancamiento
O1. Convocatorias Sector Defensa y MinCiencias: Acceso a fondos de cofinanciación de JEAES, DICTI y MinDefensa orientados a soberanía tecnológica. O2. Alianzas Estratégicas con IES: Redes activas de co-investigación con universidades acreditadas (Uniandes, ECCI) y centros tecnológicos. O3. Demanda de Autonomía Logística: Requerimiento urgente de CAMAN y unidades aéreas para mitigar obsolescencia (DMSMS) y sustituir importaciones. O4. Soporte Instrumental CETIA: Disponibilidad de pasantías técnicas, caracterización avanzada y	• Impulso I+D+i con Soporte Operacional Real (F1, F2, F3 + O1, O3): Formular macroproyectos aplicados en bancos de motores (biocombustibles SAF, mantenimiento predictivo) y talleres en sinergia con CAMAN, financiados por convocatorias DICTI para resolver problemas críticos de flota. • Ecosistema de Semilleros y Grupos en Red (F4, F5 + O2, O4): Articular el Semillero INNOVA y los grupos GICMA/GIEA con la Universidad de los Andes, Universidad ECCI y el CETIA mediante pasantías técnicas, talleres de creación y acceso compartido a laboratorios de alta gama.	• Programa de Tutoría Temprana y Coautoría Externa (D1, D4 + O1, O2): Apalancar los convenios con IES aliadas para establecer co-direcciones y tutorías metodológicas tempranas que transformen los mejores trabajos de grado en artículos indexados (Scopus/WoS) y registros de propiedad intelectual. • Modernización Instrumental y Gobernanza Digital (D3, D5 + O1, O4): Concursar en fondos de fortalecimiento de JEAES/DICTI y apalancar el CETIA para modernizar sensores/software, delimitar células de investigación en taller y centralizar la trazabilidad digital para CvLAC/GrupLAC.

MATRIZ DOFA INTEGRADA — ESCUADRÓN DE INVESTIGACIÓN (ESINV-ESUFA) 2027–2031		
articulación industrial a través del CETIA.		
AMENAZAS (A) (Factores Externos / Riesgos)	ESTRATEGIAS FA (Max – Min) Defensivas de Mitigación	ESTRATEGIAS DA (Min – Min) Supervivencia y Blindaje Institucional
A1. Coyuntura Presupuestal y Fiscal: Restricciones macroeconómicas nacionales que puedan retrasar o recortar adquisiciones del PAA. A2. Rigurosidad del Modelo MinCiencias: Exigencias crecientes en las ventanas de medición de grupos (productos TOP, doctores y cohesión). A3. Obsolescencia Tecnológica Acelerada: Rápida evolución tecnológica y normativa del sector aeroespacial frente al ritmo de compra estatal.	• Maximización Experimental de Bancos e Infraestructura Propia (F1, F2, F3 + A1, A3): Mitigar eventuales retrasos presupuestales del PAA y la obsolescencia externa maximizando el uso científico de los bancos A/M37T-20/21, hangares de ESUFA y talleres de CAMAN mediante ingenio técnico e ingeniería inversa. • Blindaje de Categoría A en ScienTI (F1, F5 + A2): Capitalizar la experiencia de la planta docente para diversificar la producción hacia Desarrollos Tecnológicos certificados, Manuales Técnicos y Regulaciones, donde ESUFA posee alta ventaja competitiva ante MinCiencias.	• Protocolo de Relevo y Memoria Institucional (D2, D5 + A2): Estandarizar expedientes digitales por proyecto y pares coinvestigadores (Militar + Civil OD de planta) para garantizar que el traslado militar no interrumpa las líneas ni afecte los indicadores de grupo ante MinCiencias. • Institucionalización de Horas Protegidas de Investigación (D4 + A1, A2): Establecer la asignación de horas protegidas de investigación en el plan de trabajo docente, asegurando producción constante incluso en escenarios de restricción presupuestal.

4.7. Problemas Prioritarios para Atender durante el Cuatrienio (2027–2031)

Para consolidar el salto cualitativo y cuantitativo del ESINV durante el cuatrienio 2027–2031, se han diagnosticado y priorizado cuatro problemas estructurales que exigen una intervención gerencial, metodológica y operativa prioritaria:

4.7.1. Superación de la Fragmentación Metodológica y Consolidación de la Trazabilidad Documental End-to-End

- Contexto y Diagnóstico: Históricamente, gran parte de la actividad investigativa formativa y de los trabajos de grado de la ESUFA ha adolecido de una gestión aislada de corto plazo, donde los desarrollos concluyen con la sustentación académica del alumno, pero carecen de trazabilidad

institucional, archivo estandarizado de datos experimentales o continuidad multianual hacia las líneas de los grupos de investigación GICMA y GIEA.

- Abordaje y Solución en el Cuatrienio: Consolidar e implantar el Procedimiento Interno de Gestión por Macroproyectos y Trazabilidad Digital del ESINV.

  Bajo este esquema, cada iniciativa aprobada se integrará formalmente al Banco de Necesidades de la FAC y los trabajos de grado de los alumnos se estructurarán como fases o paquetes de trabajo secuenciales adscritos a proyectos paraguas multianuales de los docentes investigadores, contando con un expediente digital único desde su formulación hasta su cierre y transferencia.

4.7.2. Transformación de la Investigación Formativa en Producción Científica y Tecnológica de Alto Impacto

- Contexto y Diagnóstico: A pesar del alto volumen de proyectos formativos, prácticas de laboratorio y trabajos de grado desarrollados anualmente por los alumnos de los cuatro programas tecnológicos, existe una baja tasa de conversión de estos ejercicios en productos de Nuevo Conocimiento (artículos indexados en Scopus/WoS/Publindex) o Desarrollo Tecnológico certificado, lo que limita la visibilidad externa del potencial investigativo de la Escuela.
- Abordaje y Solución en el Cuatrienio: Implementar el Programa de Acompañamiento de Tutorías Metodológicas Tempranas y Escritura Científica Co-Autoral.
- Desde el tercer semestre de formación, los mejores trabajos del Semillero INNOVA y opciones de grado serán seleccionados mediante rúbricas de mérito técnico para pasar por un proceso de diseño experimental estadístico, depuración técnica y coautoría con docentes investigadores de GICMA/GIEA y pares de universidades aliadas, garantizando la obtención de productos de alto impacto según la tipología de MinCiencias y la resolución simultánea de necesidades institucionales.

4.7.3. Sostenibilidad, Blindaje y Escalamiento de los Grupos de Investigación ante MinCiencias

- Contexto y Diagnóstico: Mantener la Categoría A alcanzada por los grupos GICMA y GIEA en la Convocatoria 957 de 2024 —y proyectar su escalamiento hacia Categoría A1 representa un desafío crítico ante las exigencias cada vez más rigurosas del Modelo de Medición de MinCiencias, especialmente en lo referente a la retención y vinculación de investigadores con formación doctoral, la categorización individual de docentes (Junior, Asociado, Senior), la cohesión interinstitucional y la generación de productos TOP y de desarrollo tecnológico e innovación.
- Abordaje y Solución en el Cuatrienio: Estructurar y ejecutar el Plan Dinámico de Vigilancia CTeI, Alistamiento y Simulación para Medición ScienTI, que incluirá auditorías semestrales de indicadores de grupo, la actualización obligatoria y en tiempo real de CvLAC y GrupLAC, el fortalecimiento de alianzas de co-investigación con IES acreditadas, el impulso a la formación avanzada (maestrías y doctorados) de los docentes de planta y la priorización de productos de Desarrollo Tecnológico e Innovación (prototipos, manuales técnicos, normas y regulaciones aeronáuticas).

4.7.4. Brecha de Articulación Práctica y Transferencia Tecnológica Efectiva hacia las Unidades Logísticas

- Contexto y Diagnóstico: Frecuentemente, los desarrollos, productos y soluciones concebidas en el ámbito académico encuentran barreras logísticas, normativas de certificación aeronáutica o metodológicas, para ser adoptadas, probadas e implementadas en las unidades operativas de la FAC.
- Abordaje y Solución en el Cuatrienio: Institucionalizar el Protocolo Operacional y Asistencia Tecnológica Institucional ESUFA – CAMAN – CETIA. Apalancándose en el soporte de infraestructura y pasantías provisto por el CETIA y en la cooperación técnica directa con el CAMAN, todo proyecto se formulará con un "Usuario Operacional Padrino", incorporando criterios de aeronavegabilidad y normas de calidad aeronáutica (AS9100 / ISO 17025) hasta alcanzar validaciones en entorno relevante (TRL 5–6)

respaldadas por Actas de Apropiación e Implementación Técnica.

5. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN

5.1. Necesidad Institucional y Estratégica que Atiende

El presente Plan de Trabajo Cuatrienal (2027–2031) responde de manera directa a las directrices superiores consignadas en la Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial (EDAES 2042) y en la Política de CTeI del Sector Defensa 2024, orientadas a consolidar sistemas educativos de excelencia y centros de pensamiento tecnológico capaces de garantizar la soberanía tecnológica, la resiliencia operacional y la autonomía logística de la Institución frente a un entorno geopolítico y técnico de alta complejidad y restricción en las cadenas globales de suministro aeronáutico.

La operación multidominio y el mantenimiento de aeronaves, plantas motrices, sistemas de defensa antiaérea, aviónica, comunicaciones y seguridad aeroportuaria de la FAC exigen que la ESUFA trascienda la instrucción puramente instrumental y cuente con un ESINV sólidamente estructurado, capaz de sintonizar la formación técnico-aeronáutica del Suboficial con la solución científica de problemas críticos de las unidades operativas y de soporte mayor.

5.2. Problemáticas y Brechas Estructurales que se Pretenden Cerrar

Históricamente, la gestión investigativa en el ámbito tecnológico sin una planeación multianual ha enfrentado el riesgo de la fragmentación y discontinuidad por relevos del personal militar, donde los trabajos de grado de los alumnos y las iniciativas aisladas de los instructores concluían con la entrega de un documento académico sin lograr continuidad operativa, maduración tecnológica (TRL), registro sistemático en bases de datos indexadas o un impacto medible en las líneas de vuelo.

Este Plan Cuatrienal establece una solución estructural definitiva hacia un modelo de gestión multianual planificado que sincroniza la planeación académica (ESEDU/GRACA), la planeación científica (DICTI/Grupos GICMA y GIEA) y la planeación contractual y presupuestal (Plan Anual de Adquisiciones PAA). De esta forma, se estandarizan los flujos de trabajo, se dinamizan los grupos de investigación y se integra el esfuerzo del semillero INNOVA bajo una hoja de ruta con metas financieras, cronogramas por fases e indicadores verificables.

5.3. Contribución al Fortalecimiento del Ecosistema de Investigación

El Plan promueve una cultura científica aplicada, experimental y rigurosa al articular formalmente las aulas, los talleres aeronáuticos y los bancos de prueba de

motores (A/M37T-20 y A/M37T-21) de ESUFA con el ecosistema de ciencia y tecnología de la FAC.

Al vincular los proyectos de grado y las actividades de los semilleros con los Programas Estratégicos de Apoyo a la Misión y Desarrollo Aeronáutico, el soporte instrumental del CETIA, los talleres de CAMAN y los laboratorios de universidades aliadas, se institucionaliza el uso del diseño estadístico de experimentos (DoE), la metrología asegurada y la vigilancia tecnológica.

Esto potencia la capacidad de desarrollo experimental, elevando sustancialmente los estándares de calidad y diversidad de la producción científica y tecnológica de la Escuela.

5.4. Contribución a los Procesos de Formación Integral (MOPED FAC y Modelo DELTA)

Desde la perspectiva educativa y curricular, el Plan enriquece sustancialmente el perfil de egreso y los Resultados de Aprendizaje (RAE) del Suboficial de la Fuerza Aerea Colombiana en consonancia con el Modelo Pedagógico Institucional (MOPED FAC).

Los futuros tecnólogos de los cuatro programas académicos no solo adquieren destrezas técnico-manuales de ejecución de mantenimiento u operación, sino que desarrollan competencias cognitivas y analíticas básicas en Análisis de Causa Raíz (Root Cause Analysis - RCA), metodologías de confiabilidad (FMEA/FMECA), control estadístico de procesos, interpretación de normativa internacional (FAA, EASA, ASTM, Mil-Specs) y resolución sistemática de problemas, dotándolos de un pensamiento crítico indispensable para el desempeño laboral y la asimilación de tecnologías emergentes a lo largo de su carrera militar.

5.5. Aporte al Desarrollo de Capacidades Institucionales

El despliegue de este Plan consolida de manera sostenible las capacidades estratégicas requeridas por la ESUFA en cinco frentes: (a) infraestructura experimental optimizada y segregada para investigación en talleres y bancos de motores; (b) acceso robusto a bases de datos científicas y normativas técnicas aeronáuticas (FAA, EASA, ASTM, Mil-Specs); (c) licenciamiento de software de; (d) protocolos digitalizados y estandarizados de trazabilidad documental y propiedad intelectual alineados con el MOINV; y (e) un capital humano docente militar y civil en constante cualificación a través de posgrados (maestrías y doctorados) y redes de co-investigación con instituciones académicas de alta trayectoria.

5.6. Beneficios Esperados para la Unidad Educativa y Aseguramiento de la Calidad (SIACE)

En el marco del Decreto 1330 de 2019 y los lineamientos del Consejo Nacional de Acreditación (CNA), el Plan garantiza para la ESUFA un flujo constante, cuantificable, trazable y auditable de evidencias e indicadores de producto, resultado e impacto (productos CTeI per cápita, proyectos cofinanciados, convenios activos, movilidad académica estudiantil y docente, vinculación al semillero INNOVA e impacto en el entorno operacional). Este acervo probatorio alimenta directamente el Sistema Interno de Aseguramiento de la Calidad Educativa (SIACE), fortaleciendo los procesos de autoevaluación institucional y aportando soportes cuantitativos y cualitativos indispensables para la renovación de Registros Calificados, la Acreditación de Alta Calidad de los programas tecnológicos y la reacreditación institucional ante el Ministerio de Educación Nacional.

6. IMPACTO ESPERADO EN LA FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA (FAC)

El despliegue articulado del Plan de Trabajo Cuatrienal 2027–2031 genera un impacto estratégico multidimensional y un valor diferencial tangible para la FAC, al alinear de manera directa el esfuerzo investigativo de la ESUFA con los lineamientos del Plan Estratégico del SCtEI al 2042, la EDAES y la Política de Ciencia, Tecnología e Innovación para el Sector Defensa 2024. Este impacto se materializa en seis dimensiones operacionales y científicas:

1. Priorización del Desarrollo Técnico-Investigativo: Orientación de la capacidad instalada del Escuadrón hacia la solución científica de problemas críticos en mantenimiento predictivo, monitoreo remoto, integridad estructural, aviónica y plantas motrices, priorizando proyectos con aplicabilidad operativa inmediata que reduzcan los tiempos de aeronave en tierra (AOG) y eleven la confiabilidad y Seguridad operacional.
2. Soberanía Tecnológica y Autonomía Logística: Generación de metodologías para la optimización de procesos técnicos en articulación con CAMAN y CETIA, y desarrollo de productos, orientados a mitigar la obsolescencia tecnológica de componentes (DMSMS), reduciendo la dependencia tecnológica, los tiempos de aprovisionamiento y los costos asociados de importación.
3. Liderazgo en Transición Energética y Sostenibilidad Ambiental Aeroespacial: Aprovechamiento experimental de los bancos de prueba de

motores (A/M37T-20 y A/M37T-21) para la evaluación termodinámica, de emisiones y de compatibilidad de materiales con Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF) y mezclas de biocombustibles sobre turbinas reales de la Fuerza (J69 y PT6), posicionando a la ESUFA y a la FAC a la vanguardia nacional en descarbonización operacional y cumplimiento de estándares internacionales (OACI/CORSIA, ASTM).

4. Fortalecimiento de la Seguridad Operacional (SMS) y Protección Multidominio: Desarrollo de soluciones aplicadas en las líneas de Factores Humanos, Gestión de Riesgos, Seguridad Aeroportuaria y Sistematización de Drones (UAV) para Defensa Antiaérea, reduciendo la tasa de incidentes técnicos y fortaleciendo la protección física y electrónica de las bases aéreas.
5. Cumplimiento de Metas e Indicadores Institucionales del SCtEI: Contribución efectiva al cumplimiento de las metas de producción científica (artículos indexados Q1–Q4, libros, patentes y desarrollos tecnológicos), sostenibilidad de los grupos GICMA y GIEA en las máximas categorías de MinCiencias (Categoría A / proyección A1) y fortalecimiento de capacidades críticas exigidas por la JEAES y la DICTI.
6. Consolidación de un Ecosistema de Innovación Dual y Transformación Cultural: Entrega permanente de resultados de investigación y de promociones de Suboficiales Tecnólogos formados en el rigor del método científico y el análisis de causa raíz, instaurando en los talleres y escuadrones técnicos del país una cultura de innovación en el puesto de trabajo que responde con precisión a las políticas de modernización y soberanía aeroespacial de la Nación.

7. ESTRATEGIAS Y PORTAFOLIO DE MACROPROYECTOS CUATRIENALES (2027 – 2031)

7.1. Metodología de Gestión por Macroproyectos ("Proyectos Paraguas")

Con el propósito de minimizar la fragmentación metodológica, el Escuadrón de Investigación de la ESINV adopta para el cuatrienio 2027–2031 un Modelo de Gestión por Macroproyectos Institucionales.

Bajo esta arquitectura gerencial el ESINV, proyecta gestionar no programas o macroproyectos multianuales (a cuatro años) enfocados los grupos de investigación GIEA y GICMA. El funcionamiento sistémico de esta metodología se regira por cinco reglas operativas:

- Anclaje en el Banco de Necesidades y Programas del SCtEI: Todo macroproyecto nace de una problemática real institucional, articulándose directamente con los Programas Estratégicos de Desarrollo Aeronáutico y Apoyo a la Misión del Plan Estratégico del SCtEI al 2042.
- Desagregación Modular por Paquetes de Trabajo (Work Packages): Cada macroproyecto cuatrienal se divide en cuatro fases anuales secuenciales, a su vez, cada fase anual se subdivide en paquetes de trabajo técnicos que son asignados como trabajos de grado de nivel tecnológico a los alumnos de los programas académicos de la ESUFA y investigación formativa, de iniciación científica a los nodos del Semillero INNOVA.
- Escalamiento Progresivo de Madurez Tecnológica (TRL): Los resultados obtenidos por una promoción de alumnos en un semestre o vigencia constituyen el insumo de línea base para la siguiente cohorte estudiantil. Esto permite que el macroproyecto evolucione de forma continua desde la validación conceptual y experimental en laboratorio (TRL 1 – TRL 3) en el Año 1, hasta correlación operativa (TRL 4 – TRL 5+) en el Año 4.
- Cada macroproyecto es liderado por una dupla conformada por un Investigador Militar (Oficial o Suboficial) y un Docente Civil de Planta del Ministerio de Defensa, siendo este último, el que se encarga del seguimiento y control del expediente digital del macroproyecto, y su trazabilidad en el GrupLAC.
- Obtención de Productos MinCiencias: al finalizar cada vigencia los investigadores de acuerdo con los resultados obtenidos; proyectaran productos de Nuevo Conocimiento, Desarrollo Tecnológico e Innovación o Apropiación Social del Conocimiento.

7.2. Portafolio de Macroproyectos Estratégicos según Programas del SCtEI y Tecnologías ESUFA

7.2.1. MACROPROYECTO No. 1: Modernización, Evaluación de Biocombustibles (SAF), Diagnóstico Predictivo, para practicas standard y Servicios de Extensión Tecnológica en las Plataformas de Ensayo de Motores AM37T-20 y AM37T-21

Identificación y Alineación Estratégica del Macroproyecto

Tabla 7

Ficha técnica maestra del Macroproyecto No. 1 (Bancos de Prueba AM37T-20 y AM37T-21)

Parámetro del Macroproyecto	Descripción y Articulación Institucional
Título del Macroproyecto	Modernización, Evaluación de Biocombustibles (SAF), Diagnóstico Predictivo, para practicas standard y Servicios de Extensión Tecnológica en las Plataformas de Ensayo de Motores AM37T-20 y AM37T-21
Grupo de Investigación Líder y Co-ejecutor	Grupo de Investigación en Ciencias y Tecnologías Aeroespaciales (GIEA) líneas de investigación: (Tecnologías Emergentes en Mantenimiento Aeronáutico, Propelentes y programa de propulsión, Educación y TICs, Cohetería)
	Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas (GICMA) líneas de investigación:(Seguridad Operacional, Gestión Tecnológica e Innovación)
Semillero Articulado	Semillero de Investigación INNOVA (Nodos de Mantenimiento, Electrónica, Seguridad y Abastecimientos).
Programas Estratégicos SCtEI FAC	1. Programa de Apoyo a la Misión (Subprogramas Educación y TICs, Gestión Tecnológica e Innovación).
	2. Programa de Desarrollo Aeronáutico (Subprogramas Tecnologías Emergentes en Mantenimiento Aeronáutico, Suficiencia Institucional).
Posibles Alianzas	Internos FAC: DICTI, JEAES, CAMAN y CETIA.
	Externos: Ecopetrol / Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Universidad de los Andes, Universidad ECCI, otras facultades de ingeniería del país y sector industrial energético/biocombustibles.
Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)	TRL Inicial (2028): TRL 2 (Concepto tecnológico formulado).
	TRL Final Esperado (2031): TRL 4 / TRL 5 (Demostración de sistema y protocolos de ensayo c en entorno operacional relevante).

La ESUFA cuenta con los bancos de pruebas AM37T-20, y AM37T-21, abastecidos por un sistema centralizado de almacenamiento de combustible de 2.500 galones.

Durante los últimos ocho (8) años, estas plataformas han prestado un servicio dual como laboratorios de instrucción práctica (Niveles 1 y 2 de mantenimiento,

inspección, caza-fallas y corrida de motores) y como bancos experimentales para el estudio preliminar de mezclas de biocombustibles.

.2.2. MACROPROYECTO No. 2: Puesta a Punto Integral, Sostenimiento Logístico, Modernización Inmersiva e Investigación Aplicada en el Simulador de Silla de Eyección con Brazo Robótico FANUC (Laboratorio de Simulación y Respuesta Aeroespacial ESUFA) Identificación y Alineación Estratégica del Macroproyecto Tabla 9

Ficha técnica maestra del Macroproyecto No. 2 (Simulador de Silla de Eyección – Brazo Robótico FANUC)

Parámetro del Macroproyecto	Descripción y Articulación Institucional
Título del Macroproyecto	Puesta a Punto Integral, Sostenimiento Logístico, Modernización Inmersiva e Investigación Aplicada en el Simulador de Silla de Eyección con Brazo Robótico FANUC de la ESUFA.
Grupo de Investigación Líder y Co-ejecutor	Grupo de Investigación en Ciencias y Tecnologías Aeroespaciales (GIEA) líneas de investigación: (Tecnologías Emergentes en Mantenimiento Aeronáutico, , Educación y TICs,)
	Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas (GICMA) líneas de investigación:(Seguridad Operacional, Gestión Tecnológica e Innovación)
Semillero Articulado	Semillero de Investigación INNOVA (Nodos de Mantenimiento, Electrónica, Seguridad y Abastecimientos).
Programas Estratégicos SCtEI FAC	1. Programa de Apoyo a la Misión (Subprogramas Educación y TICs, Gestión Tecnológica e Innovación).
	2. Programa de Desarrollo Aeronáutico (Subprogramas Tecnologías Emergentes en Mantenimiento Aeronáutico, Suficiencia Institucional).
Posibles Alianzas	Internos FAC: DICTI, JEAES, CAMAN y CETIA.
	Externos: Ecopetrol / Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Universidad de los Andes, Universidad ECCI, otras facultades de ingeniería del país y sector industrial energético/biocombustibles.
Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)	TRL Inicial (2028): TRL 2 (Concepto tecnológico formulado).
	TRL Final Esperado (2031): TRL 4 / TRL 5 (Demostración de sistema y protocolos de ensayo c en entorno operacional relevante).

7.3. Componentes Técnicos Estructurales del Macroproyecto (2027–2031)

El Macroproyecto No. 1 se despliega durante los cuatro años (2027–2031) a través de cinco (5) componentes técnicos interdependientes:

Componente 1: Sostenimiento Metrológico, Modernización Instrumental Progresiva y Adecuación de Infraestructura

La puesta a punto inicial, se fundamenta en restituir la funcionalidad base, pero la investigación científica publicable en revistas de alto impacto (Scopus Q1/Q2) exige trazabilidad metrológica continua y ampliación de canales de medición. Este componente comprende:

- Plan de Mantenimiento Progresivo Plurianual: Ejecución anual de rutinas de preservación anticorrosiva en los tráileres, limpieza de inyectores, cambio programado de elementos filtrantes, verificación de estanqueidad del tanque de 2.500 galones y un mantenimiento mayor de mitad de ciclo (Año 2029) para garantizar cero paralizaciones operativas.
- Ampliación de Instrumentación (PAA 2027–2030): Incorporación progresiva de flujómetros másicos (para medir de forma independiente el flujo de mezclas en líneas secundarias sin contaminar el tanque principal de 2.500 galones), termocuplas tipo K y tipo E adicionales para mapeo térmico, transductores de presión dinámica, vibracion y acelerómetros piezoeléctricos triaxiales IEPE de banda ancha.
- Aseguramiento Metrológico (Rumbo a ISO/IEC 17025): Calibración periódica trazable a patrones nacionales/internacionales (ONAC/NIST) de las celdas de carga Toroid 39-65, sistema de adquisición de datos y celdas electroquímicas del analizador de gases GA-21 PLUS.
- Sistema Dedicado de Alimentación de Combustibles Alternativos (Blended Fuel Skid): Diseño y construcción de un carro o tanque auxiliar nodriza instrumentado (de 50 a 100 galones en acero inoxidable con agitación mecánica/recirculación) acoplable a las líneas de los bancos AM37T-20 y AM37T-21, esto permitirá correr pruebas con diferentes porcentajes de mezclas de biocombustibles (SAF) o combustibles sintéticos sin necesidad de drenar ni contaminar el tanque principal de 2.500 galones que almacena el Jet A-1 de instrucción estándar.

Componente 2: Digitalización Avanzada, Gemelo Digital Termodinámico y Telemetría Remota

Migración a software libre de los módulos National Instruments, el ESINV desarrollará capacidades propias de ingeniería de software y procesamiento de señales:

- Consolidación de Software de Captura y Cálculo Termodinámico: Evolución de la interfaz de código abierto, para que no solo registre variables crudas, sino que ejecute en tiempo real el balance de masa, energía y exergía del ciclo Brayton (eficiencia isentrópica de compresor y turbina, empuje neto corregido a condiciones ISA, consumo específico de combustible TSFC, relación de presiones EPR y transferencia de calor), generando cartas de prueba digitales automatizadas y exportables.
- Telemetría y Monitoreo Remoto en Tiempo Real : Desarrollo de una arquitectura de transmisión segura de datos desde la cabina de control de los bancos hacia un servidor local o aula de simulación en la ESUFA, esto permitirá que grupos completos de alumnos de ESUFA o de entidades en convenio visualicen en pantallas remotas todos los parámetros del motor y video en vivo sin congestionar físicamente la cabina de control ni exponerse a altos niveles de ruido.
- Gemelo Digital (Digital Twin) Estacionario: Proyección de un modelo computacional paramétrico de los motores J69 y PT6A-61, calibrado con los datos experimentales reales obtenidos en los bancos AM37T-20 y AM37T-21.

Componente 3: Investigación Experimental en Transición Energética y Combustibles Sostenibles de Aviación (SAF)

En alineación con la estrategia institucional de descarbonización (OACI/CORSIA) y con el programa de desarrollo aeronautica del SCtEI, los bancos AM37T-20 y AM37T-21 operarán como el laboratorio nacional de referencia para evaluar combustibles alternativos:

- Caracterización Comparativa de Mezclas con / Jet A-1: Ejecución de diseños experimentales factoriales (DoE) evaluando mezclas graduales (B5, B10, B20, B30 y hasta 50% según ruta ASTM D7566 / ASTM D1655) de posibles

biocombustibles derivados de aceite de palma, ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA-SPK) o Alcohol-to-Jet (ATJ), u otras fuentes; en cooperación con entidades como Ecopetrol, universidades y productores nacionales.

- Análisis de Desempeño Mecánico, Térmico y Ambiental: Evaluación simultánea del impacto de cada mezcla sobre las condiciones operacionales de los motores.
- Compatibilidad de Materiales y Degradación en Sección Caliente: Evaluación metalúrgica, química y superficial (con apoyo de laboratorios de CETIA, CAMAN y otras entidades academicas) del efecto de los biocombustibles sobre elastómeros (sellos, diafragmas de válvula de sangrado 3102065-01), filtros, inyectores y recubrimientos metálicos de álabes de turbina tras ciclos acumulados de operación.

Componente 4: Diagnóstico Predictivo, Análisis de Vibraciones y Confiabilidad Operacional (SMS)

- Mantenimiento Predictivo e Inteligencia Artificial: Utilización de las señales capturadas por los arneses de vibración para modelos de aprendizaje automático (Machine Learning / Redes Neuronales / Análisis Espectral FFT y Envolvente) capaces de detectar desbalanceo de rotores, desalineación, desgaste de rodamientos, cavitación en bombas o fallas incipientes en las turbinas de gases aeronáuticos.
- Estudios de Factores Humanos y Seguridad Operacional: Evaluación de carga cognitiva, ergonomía en cabina de pruebas, atenuación acústica, protocolos de comunicación por intercom y perfeccionamiento de matrices de riesgo SMS para operaciones de prueba de motores en tierra.

Componente 5: Modelo de Extensión Tecnológica, Venta de Servicios y Uso Compartido Interinstitucional ("Hora-Banco ESUFA")

Más allá del uso interno para la formación de suboficiales e investigación propia, el Macroproyecto No. 1 transforma los bancos AM37T-20 y AM37T-21 en activos generadores de valor, recursos y posicionamiento estratégico mediante la oferta de servicios científicos y académicos al entorno nacional:

Tabla 8

Portafolio de Servicios de Extensión Tecnológica y Académica de los Bancos de Prueba

Línea de Servicio	Público Objetivo	Descripción Técnica del Servicio Ofrecido	Mecanismo
1. Prácticas de Laboratorio ("Hora-Banco Académica")	Facultades de Ingeniería Aeronáutica, Mecánica, Termodinámica, Química, Electrónica y Mecatrónica de IES nacionales.	Alquiler/uso programado por horas de corrida en tierra de turbina a reacción (J69) o turbohélice (PT6A-61). Incluye: inducción de seguridad industrial, operación del motor por personal técnico de ESUFA, visualización en tiempo real de parámetros y entrega del archivo digital de datos.	Convenios Específicos de Cooperación y Contraprestación Tecnológica: La entidad paga el paquete de horas-banco mediante el suministro directo de insumos para el ESINV (Jet A-1, compra de sensores, pago de calibraciones ONAC, licencias de software, financiación de publicaciones o cupos de posgrado para docentes de ESUFA).
2. Ensayos de Combustibles, Aditivos y Lubricantes ("Testbed Industrial")	Sector energético y petroquímico (Ecopetrol - ICP, productores de biodiésel/SAF, fabricantes de aditivos y lubricantes aeronáuticos, CIAC).	Ejecución de campañas experimentales bajo protocolo estandarizado para validar el comportamiento térmico, consumo específico (TSFC), emisiones de gases (GA-21 PLUS) e inspección boroscópica post-corrida de nuevas formulaciones de biocombustibles o aditivos en turbinas reales antes de escalar a pruebas en vuelo.	Contratos o Convenios Interadministrativos de Cofinanciación de I+D+i articulados a través de la DICTI, CETIA o CIAC, donde la entidad externa asume los costos operativos, combustibles, repuestos, análisis especializados y transfiere equipamiento permanente al laboratorio de ESUFA.
3. Validación de Instrumentación, Sensores y Sistemas de Adquisición	Centros de desarrollo tecnológico, empresas de electrónica/automatización y grupos de investigación externos.	Uso de las bancadas AM37T-20 y AM37T-21 como entorno relevante con vibración, temperatura y ruido real de turbina para poner a prueba nuevos sensores, aislantes térmicos o algoritmos de telemetría desarrollados por terceros.	Acuerdos de Co-Investigación y Cotitularidad de Propiedad Intelectual: Participación porcentual de la FAC/ESUFA en las patentes, modelos de utilidad o registros de software resultantes, además de coautoría obligatoria para los investigadores de GIEA/GICMA.
4. Cursos de Extensión y Diplomados Prácticos en Plantas Motrices y Pruebas en Tierra	Técnicos aeronáuticos de empresas privadas (TAR/TARE), personal de aviación de Estado (Ejército, Armada, Policía) y profesionales del sector.	Capacitación teórico-práctica en operación de bancos de prueba, análisis de cartas de performance, caza-fallas eléctricas/mecánicas y metrología de turbinas.	Educación Continuada / Extensión Académica ESUFA: Ingresos o contraprestación destinados al sostenimiento de los laboratorios y fortalecimiento del Semillero INNOVA.

7.4. Componentes Técnicos Estructurales del Macroproyecto No. 2 (2027–2031)

Para garantizar la reactivación certificada del sistema en el Año 1 (2027) mediante la inversión inicial prioritaria de $400.000.000 COP y su posterior sostenibilidad, el Macroproyecto No. 2 se despliega a través de cinco (5) componentes técnicos:

- Componente 1: Plan de Mantenimiento en el Área Robótica Total y Estructuración del Plan de Mantenimiento del Brazo Robot FANUC (Recuperación Cinemática de 6 Ejes / 360°)
    - Intervención Mayor y Remasterización de los Seis (6) Ejes (J1 a J6): Flushing interno, limpieza profunda y relubricación con grasa sintética de extrema presión OEM FANUC en reductores armónicos y cicloides para suprimir ruidos mecánicos.
    - Calibración Cinemática, Cero (Zero Mastering) y Liberación de 360°: Sustitución de baterías de respaldo de encoders absolutos, ejecución de rutinas de Fixture Position Master mediante consola Teach Pendant, restableciendo los límites de giro continuo en los 6 grados de libertad (360°) para simular actitudes anormales de vuelo y eyecciones complejas.
    - Inspección Electromecánica: Verificación de torques en pernos de cimentación, pruebas dieléctricas en servomotores AC y revisión de arneses de potencia contra fatiga por torsión.
- Componente 2: Plan de Mantenimiento del Área de Planta Eléctrica, Transformadores, Digitalización y Actualización de Software/Firmware
    - Mantenimiento de Subestación, Planta y UPS: Protocolo termográfico infrarrojo, análisis de armónicos, mantenimiento de transformadores y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) que resguardan el controlador robótico.
    - Actualización Digital: Depuración y optimización del software de control de trayectorias (VPP_FUERZA_AEREA_DX200), actualización de estaciones gráficas con GPU de alto rendimiento y unificación de la telemetría de cabina.
- Componente 3: Plan de Mantenimiento del Área Neumática, Sistemas de Actuación Física y Cabina Modular
    - Subsistema Neumático: Mantenimiento preventivo de compresores silenciosos, unidades FRL, electroválvulas proporcionales y racores rotativos de alimentación continua.
    - Actuación Háptica y Viento (FP-03 / FP-06): Integración de actuadores vibro-hápticos en el espaldar de la silla y generadores de impacto de viento (wind-blast) para simular la desaceleración de salida de riel.

    - Arquitectura Modular (FP-05): Diseño de acoples rápidos para configurar la cabina a las aeronaves operadas por la FAC (A-29, T-6C, Kfir).

- Componente 4: Plan de Mantenimiento del Área de Simulación Inmersiva (RV), Integración Táctica y Monitoreo Biométrico
    - Realidad Virtual con Eye-Tracking (FP-01): Actualización a visores RV de alta resolución con seguimiento ocular integrado, eliminando puntos ciegos durante los giros de 360°.
    - Sincronización con Fly Simulator (FP-02): Desarrollo de middleware para integrar emergencias de vuelo en tiempo real con las rutinas de movimiento del robot FANUC.
    - Instrumentación Biométrica (FP-04): Monitoreo no invasivo de frecuencia cardíaca, HRV, respuesta galvánica de la piel (GSR) y estrés agudo en tripulantes.
- Componente 5: Institucionalización de Talento Humano y Sostenibilidad Operativa
    - Relevo Generacional: Capacitación y certificación oficial de un equipo técnico permanente en ESUFA (docentes OD, suboficiales y semillero INNOVA) para asegurar la independencia operativa del sistema.
    - Extensión y Entrenamiento Conjunto: Cobertura total de la demanda FAC y oferta de servicios a la Aviación de Estado y Fuerzas Amigas.

Tabla 10 Portafolio de Servicios Operacionales, Académicos y de Extensión del Laboratorio de Simulación de Silla de Eyección ESUFA

Línea de Servicio	Público Objetivo	Descripción Técnica del Servicio Ofrecido	Mecanismo de Sostenibilidad y Retorno Institucional
Entrenamiento Táctico e Instintivo de Eyección y Supervivencia en 6 Ejes (360°)	Pilotos y tripulantes de combate de la FAC y Alféreces de EMAVI.	Entrenamiento inmersivo en postura de eyección, caos táctico (Fly Simulator + RV), fuerzas G en 360° y biometría de estrés.	Sustitución de Importación de Servicios (Cost Avoidance): Ahorro de USD $6.000 por piloto frente al costo en NASTAR Center (EE. UU.). Se amortiza la inversión inicial con solo 16 pilotos entrenados en ESUFA.

Prácticas de Robótica Industrial, Mecatrónica y Aviónica	Alumnos de ESUFA, Semillero INNOVA e IES aliadas en convenio.	Uso guiado del ecosistema FANUC, programación cinemática, desarrollo RV e integración biométrica.	Convenios de Cooperación Académica (Triple Hélice): Contraprestación en software, hardware, cofinanciación de proyectos y coautoría en artículos Q1–Q4.
Evaluaciones Aeromédicas y Ergonomía	Centro de Medicina Aeroespacial (CEMAE) y Dirección de Sanidad FAC.	Cuantificación objetiva de tolerancia psicofisiológica y tiempos de reacción bajo desorientación espacial simulada.	Proyectos Cofinanciados de I+D+i (DICTI / MinCiencias): Apalancamiento de recursos para investigación científica y publicaciones conjuntas.
Entrenamiento de Emergencia para Aviación de Estado	Tripulaciones de Ejército, Armada, Policía y Fuerzas Aéreas de la región.	Cursos teórico-prácticos de procedimientos de emergencia en cabina modular (FP-05).	Convenios Interadministrativos: Contraprestación en insumos, repuestos y calibraciones para el mantenimiento anual del simul

8. MATRIZ CUATRIENAL DE METAS, PRODUCTOS MINCIENCIAS E INDICADORES (2027 – 2031)

8.1. Metas de Producción Científica y Tecnológica por Tipología de MinCiencias

Para asegurar que los grupos GIEA y GICMA mantengan su clasificación, en las convocatorias de medición de MinCiencias durante el periodo 2027–2031, y que simultáneamente que los Macroproyectos entreguen resultados tangibles y auditables, el ESINV-ESUFA establece la siguiente matriz de metas de producción científico-tecnológica:

Tabla 11 Matriz Cuatrienal Consolidada de Metas de Producción MinCiencias del ESINV-ESUFA (Aporte Conjunto Bancos de Prueba y Simulador de Silla de Eyección)

Cód.	Nombre del Indicador	Tipo de Indicador	Fórmula de Cálculo	Unidad	Meta 2027	Meta 2028	Meta 2029	Meta 2030/31	Frecuencia de Medición y Fuente de Verificación
IND-01	Índice de Articulación de Trabajos de Grado	Gestión / Formativo	N.º Trabajos de grado adscritos a Macroproyectos/Total Trabajos de grado inscritos en ESUFA×100	%	20%	30%	40%	50%	Semestral. Actas de comité de investigación ESINV y repositorio institucional.
IND-02	Tasa de Conversión de Investigación	Producto	N.º Trabajos de grado que generan artículo, producto/Total	%	20%	30%	30%	40%	Anual. Soportes en GrupLAC / CvLAC y certificados editoriales.

	Formativa en Productos CTeI		Trabajos de grado sustentados×100						
IND-03	Productividad Científica Per Cápita de Investigadores ESINV	Producto / ScienTI	Total, productos GNC + DTI por año / N.º total investigadores ESINV	Ratio	1,2	1,5	1,8	2	Anual. Auditoría de perfiles CvLAC y aplicativos GrupLAC (GIEA y GICMA).
IND-04	Sostenibilidad y Categorización de Grupos en MinCiencias	Impacto / ScienTI	Categoría obtenida por los grupos GICMA y GIEA en las convocatorias nacionales de medición de MinCiencias	Categoría	Sostenimiento Cat. A	Sostenimiento Cat. A	Proyección A1 / Cat. A	Cat. A1 / Cat. A	Bianual (según calendario MinCiencias) y simulaciones internas semestrales.
IND-05	Disponibilidad Operativa y Metrológica de los Bancos AM37T-20 y AM37T-21	Gestión / Infraestructura	(Horas disponibles operativas al año de los bancos Motores/Horas totales programadas de docencia, I+D+i y extensión) ×100	%	80%	90%	90%	95%	Trimestral. Bitácora técnica de los bancos de prueba e informes de mantenimiento.
IND-06	Ejecución de Pruebas Experimentales e Instrucción en Bancos de Motores	Producto / Operativo	Sumatoria de horas de corrida / uso experimental e instructivo registradas en los bancos AM37T-20 y AM37T-21 por año	Horas / Año	40	60	80	100	Semestral. Cartas de prueba generadas por el software DAQ y bitácoras de operación.
IND-07	Servicios de Extensión, Convenios y Uso Externo de Bancos de Prueba	Impacto / Extensión	N.º de convenios específicos, servicios de "Hora-Banco" o proyectos cofinanciados ejecutados con IES externas o empresas (ej. Ecopetrol, Uniandes, ECCI)	Cantidad	1	2	2	5	Anual. Convenios suscritos, actas de contraprestación e informes financieros/técnicos.
IND-08	Cualificación Doctoral y Categorización Individual de Investigadores	Capacidad / Talento Humano	Porcentaje de investigadores del ESINV categorizados en MinCiencias (Junior, Asociado, Senior) y/o en formación doctoral	%	5%	15%	20%	30%	Anual. Resultados de convocatoria MinCiencias y certificados de matrícula doctoral.
IND-09	Cumplimiento de la Programación Presupuestal en el PAA (Investigación y Laboratorios)	Gestión Financiera	(Presupuesto comprometido y ejecutado par I+D+i /Presupuesto proyectado y asignado anual) x 100	%	≥ 95%	≥ 95%	≥ 95%	≥ 98%	Trimestral. Certificados de Disponibilidad Presupuestal (CDP), RP y actas de recibo a satisfacción en SECOP II / SIIF.
IND-10	Disponibilidad Operativa y Cinemática 360° del Simulador FANUC	Gestión / Infraestructura	(Horas disponibles operativas al año de los bancos Motores/Horas totales programadas de docencia, I+D+i y extensión) ×100	%	40%	70%	80%	95%	Trimestral. Bitácora técnica de los bancos de prueba e informes de mantenimiento.

IND-11	Ahorro Estratégico y Eficiencia en Entrenamiento de Eyección	Gestión Financiera	Entrenamiento local en ESUFA con cero dependencias de envíos a NASTAR Center (EE. UU.).	cantidad	0	10	20	30	Verificacion anual registrada de personal capacitado

9. PROGRAMACIÓN PRESUPUESTAL

9.1. Consolidado Presupuestal Cuatrienal

Para garantizar la viabilidad financiera del Macroproyecto sin sobrecargar exclusivamente el presupuesto de funcionamiento de la ESUFA, se propone el siguiente esquema que combina las siguientes fuentes de recursos:

- Rubro de Funcionamiento ESUFA: Asegura el sostenimiento vital, preventivo, correctivo y metrológico de los bancos, siguiendo la ventana progresiva a cuatro años.
- Rubro de Inversión / Cofinanciación Interna CTeI (DICTI / JEAES): Apalanca la compra de instrumentación científica complementaria, sensores avanzados y herramientas de desarrollo experimental.
- Recursos Externos y Contraprestación en Especie (Convenios Triple Hélice / Venta de Servicios "Hora-Banco"): Ingresos en insumos, análisis de laboratorio, calibraciones y apoyo aportados por las entidades aliadas y empresas del sector energético a cambio del uso de bancos y laboratorio. (Condicionado a consolidación de convenios o Alianzas)

Tabla 11

Resumen Financiero Plurianual Proyectado para el Macroproyecto No. 1 en valores constantes (COP)

Fuente de Financiación / Rubro Presupuestal	Vigencia Año 1 (2027)	Vigencia Año 2 (2028)	Vigencia Año 3 (2029)	Vigencia Año 4 (2030)	Total Cuatrienio (2027 – 2031)	(%)
ESUFA (Mantenimiento de Equipos, Calibración y Consumibles de Banco)	$ 60.000.000	$ 65.000.000	$ 70.000.000	$ 80.000.000	$ 275.000.000	72,4
Financiación Interna FAC (Convocatorias DICTI / JEAES)	$ 10.000.000	$ 15.000.000	$ 20.000.000	$ 25.000.000	$ 70.000.000	18,4
Recursos Externos y Contraprestación por Servicios de Extensión (Convenios IES, "Hora-Banco", Ecopetrol, CETIA) CONDICIONADO A CONVENIOS	$ 0	$ 0	$ 15.000.000	$ 20.000.000	$ 35.000.000	9,2
TOTAL, ANUAL PROYECTADO	$ 70.000.000	$ 80.000.000	$ 105.000.000	$ 125.000.000	$ 380.000.000	100,0

Tabla 12

Resumen Financiero Plurianual Proyectado para el Macroproyecto No. 2 en valores constantes (COP)

Fuente de Financiación / Rubro Presupuestal	Vigencia Año 1 (2027)	Vigencia Año 2 (2028)	Vigencia Año 3 (2029)	Vigencia Año 4 (2030)	Total Cuatrienio (2027 – 2031)	(%)
ESUFA (Mantenimiento de Equipos, Calibración y Consumibles de Banco)	$ 0	$ 50.000.000	$ 80.000.000	$ 80.000.000	$ 210.000.000	52,5
Financiación Interna FAC (Convocatorias DICTI / JEAES)	$ 0	$ 50.000.000	$ 70.000.000	$ 70.000.000	$ 190.000.000	47,5
TOTAL, ANUAL PROYECTADO	$ 0	$ 100.000.000	$ 150.000.000	$ 1.000.000	$ 400.000.000	100,0

10. MECANISMOS DE SEGUIMIENTO, EVALUACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE RIESGOS DEL PLAN

10.1. Esquema de Gobernanza, Seguimiento Progresivo y Control de Cumplimiento

El seguimiento al avance físico, técnico, presupuestal y científico del Plan de Trabajo Cuatrienal 2027–2031 se ejecutará mediante los siguientes controles periodicos:

- Control Operativo Mensual (Comité Interno del ESINV y Supervisión de Bancos): El ESINV, verificará mensualmente la bitácora de operación de los bancos, el avance de Las actividades y el cumplimiento de las horas de investigación de los docentes de planta.
- Evaluación Trimestral de Ejecución Contractual y Presupuestal:

Al cierre de cada trimestre, el ESINV revisará la estructuración oportuna de los Estudios Previos, análisis del sector, cotizaciones para garantizar que los recursos asignados para mantenimiento, calibración y adquisición de insumos de los bancos se comprometan en el primer semestre de cada vigencia, evitando riesgos de rezago presupuestal.

- Auditoría Científica Semestral (Simulación ScienTI y Reporte SIACE): En el mes de noviembre de cada año, el ESINV efectuará una auditoría obligatoria de actualización de los CvLAC de los investigadores y cargue de productos en el GrupLAC (GIEA y GICMA), cruzando los productos obtenidos frente a las metas. Los soportes documentales se cargarán en el expediente digital único para alimentar los informes de autoevaluación y aseguramiento de la calidad (SIACE) requeridos por el MEN y el CNA.

- Revisión Anual de Dirección (Reporte a JEAES y DICTI): Al finalizar cada vigencia anual, el ESINV presentará ante JEAES y la DICTI el Informe Ejecutivo Anual de Cumplimiento del Plan Cuatrienal, detallando el porcentaje de logro de las metas.

10.2. Matriz de Gestión de Riesgos del Plan Cuatrienal (2027 – 2031)

Integrando los factores críticos identificados en el análisis DOFA y los riesgos técnicos y operativos propios de las plataformas de ensayo de motores, se establece la matriz de riesgos estratégicos del Plan Cuatrienal:

Tabla 13

Matriz de Identificación, Valoración y Mitigación de Riesgos del Plan de Trabajo Cuatrienal ESINV-ESUFA (2027–2031)

Cód.	Tipo de Riesgo	Descripción del Riesgo Estratégico u Operativo	Nivel de Riesgo Inicial	Medida de Tratamiento, Mitigación y Control Institucional	Responsable del Control
R-01	Talento Humano / Continuidad	Interrupción del desarrollo investigativo, debido al traslado o rotación por necesidades institucionales del personal investigador	Medio - Alto	Aplicación estricta del Protocolo de Duplas Coinvestigadores (Militar + Docente Civil de Planta) y respaldo obligatorio de todas las actividades en Repositorio Digital Centralizado del ESINV.	GRUAC ESUFA
R-02	Presupuestal / Fiscal	Recortes o aplazamientos en las apropiaciones presupuestales que afecten el mantenimiento anual o la compra de equipos y suministros para los bancos de prueba.	Alto	Diversificación de fuentes mediante postulación a convocatorias internas DICTI y externas (MinCiencias).	JEAES/ GRUAC ESUFA
				Operacionalización del Modelo de Contraprestación en Especie ("Hora-Banco") con entidades aliadas	
R-03	Tecnológico / Operacional	Descalibración de sensores, fallas en los módulos de adquisición de datos o incidentes mecánicos en los motores J69 y PT6A-61 por uso intensivo en instrucción e investigación.	Medio - Alto	Cumplimiento riguroso de las listas de chequeo preoperacionales y post-operacionales según manuales técnicos.	Jefe de Taller Laboratorio de Bancos de Prueba y Líder Macroproyecto
				Uso del Sistema Auxiliar de Mezcla (Fuel Skid) para no contaminar el tanque de 2.500 galones.	
				Programación plurianual preventiva y uso del monitoreo predictivo de vibraciones.	
R-04	Científico / Medición MinCiencias	Baja producción Investigativa	Medio	Diversificación inteligente de la producción hacia productos de investigación de factibilidad real de ejecución y obtención	ESINV/Docentes Investigadores.

R-05	Seguridad Industrial y Ambiental	Incidentes de seguridad ocupacional (ruido, atrapamiento, conflagración, espacios confinados en tanque de 2.500 gls) o generación de residuos peligrosos	Alto	Aplicación obligatoria de los protocolos del SG-SST (Resolución 0312 de 2019, Resolución 0491 de 2020 para espacios confinados y NTC 4642), uso estricto de EPP, operación desde cabina aislada con monitoreo por circuito cerrado de TV y disposición certificada de RESPEL con gestor ambiental autorizado.	Jefe de Taller Laboratorio de Bancos de Prueba y Líder Macroproyecto
R-06	Técnico / Operacional (Simulador Robótico)	Desmasterización cinemática del brazo FANUC, fallas en reducciones por falta de lubricación o desactualización del software de control VPP tras periodos de inactividad.	Alto	Establecimiento de rutinas preoperacionales de verificación de encoders y baterías de respaldo. Asignación estricta del presupuesto de mantenimiento preventivo anual de	Jefe de Laboratorio de Simulación
R-07	Talento Humano / Operación del Simulador	Vulnerabilidad operativa ante la ausencia de personal certificado de relevo para la operación y supervisión de cabina del simulador robótico.	Alto	Institucionalización del plan de capacitación y certificación de instructores en ESUFA (docentes civiles OD, suboficiales y semillero INNOVA)	ESINV/Docentes Investigadores.

11. ESTRUCTURA TÉCNICA DE COSTE UNITARIO Y AHORRO ESTRATÉGICO

11.1. Costo Unitario por Hora-Banco de Motores (AM37T-20 / AM37T-21)

Para poder ofrecer servicios y proyectar los ingresos/costos en el plan cuatrienal, se requiere establecer la estructura de costos directos e indirectos por una (1) hora efectiva de operación de banco (integrando alistamiento, encendido, estabilización, captura de datos y enfriamiento/corte). A continuación, se presenta la matriz de coste técnico que justifica el valor del servicio:

Tabla 14 Costo Técnico Unitario por "Hora-Banco Efectiva" (Módulo de 1 hora de corrida de motor + 2 horas de alistamiento/post-análisis en Bancos AM37T-20 o AM37T-21)

Costo	Especificación Técnica en Banco AM37T-20 (Motor a Reacción J69)	Costo Estimado Hora J69 (COP)	Especificación Técnica en Banco AM37T-21 (Motor Turbohélice PT6A-61)	Costo Estimado Hora PT6A-61 (COP)

Combustible de Aviación (Jet A-1) (Consumo promedio en régimen combinado ralentí/crucero/máximo durante prueba estandarizada)	Consumo medio en corrida didáctica/experimental (aprox. 30 a 40 galones por sesión de prueba efectiva, a tarifa promedio de referencia institucional/comercial ~$18.500/gal).	$ 740.000	Consumo medio en corrida didáctica/experimental (aprox. 20 a 30 galones por sesión de prueba efectiva, dado el menor consumo específico del turbohélice).	$ 555.000
Amortización de Mantenimiento, Consumibles y Desgaste (Reserva Técnica)	Cuota de reposición de filtros, lubricante sintético (MIL-PRF-7808 / 23699), ignitores, desgaste de comando servoeléctrico y reserva para mantenimiento anual del banco.	$ 350.000	Cuota de reposición de filtros de aceite/combustible, membrana de válvula de sangrado (Bleed Valve 3102065-01), lubricante y reserva estructural de bancada.	$ 420.000
Metrología, Instrumentación y Analizador de Gases GA-21 PLUS	Amortización por uso del Banco de pruebas AM37T-20	$ 220.000	Amortización por uso del Banco de pruebas AM37T-21	$ 200.000
Talento Humano Especializado (Operación, Seguridad e Procesamiento)	Dedicación de: Operador experto de planta motriz, Investigador/Docente Auxiliar de seguridad industrial/línea de fuego (3 horas totales por sesión).	$ 350.000	Dedicación de: Operador experto de planta motriz, Investigador/Docente Auxiliar de seguridad industrial/línea de fuego (3 horas totales por sesión).	$ 350.000
Costos Indirectos, Energía (400 Hz / UPS), SST y Gestión RESPEL, Tungar	Consumo eléctrico de fuentes 24/28 VDC y 25 VAC 400 Hz, elementos de protección personal (EPP) y disposición ambiental de drenajes de hidrocarburos (RESPEL).	$ 130.000	Consumo eléctrico de fuentes 24/28 VDC y 25 VAC 400 Hz, elementos de protección personal (EPP) y disposición ambiental de drenajes de hidrocarburos (RESPEL).	$ 150.000
COSTO TÉCNICO REAL DE OPERACIÓN (Punto de Equilibrio ESUFA)	Costo base que debe cubrirse (en dinero o en especie) por cada sesión de prueba	$ 1.790.000	Costo base que debe cubrirse (en dinero o en especie) por cada sesión de prueba	$ 1.675.000

11.2. Costo Técnico Unitario por Sesión de Entrenamiento en Simulador de Silla de Eyección y Comparativa de Ahorro frente a NASTAR Center (EE. UU.)

Para justificar la inversión inicial de $400.000.000 COP en la puesta a punto del simulador y dimensionar el impacto financiero institucional, se establece la estructura de costos por sesión de entrenamiento (Módulo estándar de 2 horas de instrucción inmersiva y evaluación biométrica) y su comparativa directa frente al costo de enviar tripulaciones al exterior:

Tabla 15 Costo Técnico Unitario por Sesión en Simulador ESUFA y Comparativa Económica frente a NASTAR Center (EE. UU.)

Parámetro de Evaluación Financiera	Modelo de Entrenamiento Local en ESUFA (Simulador FANUC 6 Ejes)	Modelo Tradicional en el Exterior (NASTAR Center - Florida, EE. UU.)
Costo Directo por Piloto / Tripulante	~$ 980.000 COP por sesión (Incluye amortización del mantenimiento anual de $20M, consumo eléctrico trifásico/transformadores/UPS, desgaste neumático y 3 horas de talento humano especializado).	~$ 25.200.000 COP (USD $6.000 tarifa base de entrenamiento en riel vertical de 1 eje en EE. UU.).
Costos Logísticos Asociados	$ 0 COP (Instalaciones propias en la ESUFA, Madrid - Cundinamarca).	~$ 8.400.000 COP adicionales por tiquetes aéreos internacionales y viáticos en dólares por cada tripulante desplazado.
Costo Total por Piloto Entrenado	~$ 980.000 COP	~$ 33.600.000 COP por tripulante
Ahorro Neto Institucional por Piloto (Cost Avoidance)	~$ 32.620.000 COP de ahorro por cada piloto entrenado en ESUFA frente al exterior.	—
Umbral de Amortización de la Inversión Inicial ($400M)	Con el entrenamiento de apenas 12 a 13 pilotos, la FAC recupera el 100% de la inversión de puesta a punto del simulador robótico.	—

Outlook

Orden de pago PAC Octubre

Desde ST. NICOLE DANIELA LOPEZ DUQUE <nicole.lopez@esufa.edu.co>
Fecha Mar 03/11/2026 12:26
Para HC. JUAN DAVID PAVA <juanpa@esufa.edu.co>

1 archivo adjunto (334 KB)
ORDEN DE PAGO OCTUBRE CTO 005-06-K-ESUFA-GRUAC-2026.pdf;

Buenas tardes,

De manera atenta me permito enviar paquete de pago Octubre, para su conocimiento.

Cordialmente;

ST. LOPEZ DUQUE NICOLE DANIELA
Jefe Sección Calidad Educativa y Acreditación
Grupo Académico
Escuela de Suboficiales FAC. "CT. Andrés M. Díaz"
Carrera 5 No. 2 – 92 Sur Madrid - Cundinamarca
Tel. 8209080 Ext. 69090
Nicole.lopez@esufa.edu.co

FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA

El contenido de este mensaje y sus anexos son propiedad de la Fuerza Aeroespacial Colombiana son únicamente para el uso del destinatario y pueden contener información de uso privilegiado o confidencial que no es de carácter público. Si usted no es el destinatario intencional, se le informa que cualquier uso, difusión, distribución o copiado de esta comunicación está terminantemente prohibido. Cualquier revisión, retransmisión, diseminación o uso del mismo, así como cualquier acción que se tome respecto a la información contenida, por personas o entidades diferentes al propósito original de la misma es ilegal.

No malgastemos la energía, cuidemos lo que es de todos.
*Antes de imprimir este correo, piense bien si es necesario hacerlo. El **Medio Ambiente** es responsabilidad de todos.*
*Piensa VERDE, usa documentos electrónicos. **Ayudemos a cuidar el Medio Ambiente**.*

Orden de pago Presupuestal de gastos Comprobante

Usuario Solicitante: MHachavezo Alexandra Chavez Oviedo
Unidad ó Subunidad Ejecutora Solicitante: 15-01-05-012 FAC ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA
Fecha y Hora Sistema: 2026-10-13-2:59 p. m.

ORDEN DE PAGO PRESUPUESTAL

Número:	404708526	**Fecha Registro:**	2026-10-02	**Unidad / Subunidad ejecutora:**	15-01-05-012 FAC ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA				
Vigencia Presupuestal	Actual	**Estado:**	Pagada	**Nro Obligación:**	104426	**Comprobante Contable de la Generación:**			
Fecha Máxima Pago:	2026-10-06	**Código de Referencia:**	04500072900404708526			**Tipo de Moneda:**	COP-Pesos	**Tasa de Cambio:**	0,00
Valor Bruto:	5.533.500,00	**Valor Deducciones:**	55.335,00	**Valor Neto:**	5.478.165,00			**Saldo x Pagar:**	0,00

VALORES PAGADOS

TRM Pago		**Valor Bruto**	**5.533.500,00**	Valor Deducciones	55.335,00	Valor Neto	**5.478.165,00**	Moneda Base Compra		**Valor MBC**	

REINTEGROS

Números				**No Recaudo:**	
Bruto Reintegrado Pesos:	0,00	**Reintegrado Deducciones Pesos:**	0,00	**Reintegrado Neto Pesos:**	0,00
Bruto Reintegrado Moneda:	0,00	**Reintegrado Deducciones Moneda:**	0,00	**Reintegrado Neto Moneda:**	0,00

TERCERO DE LA ORDEN DE PAGO

Identificación:	80429336	**Razón Social:**	JUAN DAVID PAVA	**Medio de Pago:**	Abono en cuenta

CUENTA BANCARIA

Número:	38305248018	**Banco:**	BANCOLOMBIA S.A.	**Tipo:**	Ahorro	**Estado:**	Activa

TESORERIA	**DOCUMENTO SOPORTE**						
13-01-01-DT - DIRECCION TESORO NACION DGCPTN	**Número:**	CUENTA DE COBRO N. 007	**Tipo:**	CUENTA DE COBRO	**Fecha:**	2026-10-02	

Tipo Beneficiario Pago 01 - Beneficiario final

ITEM PARA AFECTACION DE GASTOS

DEPENDENCIA / POSICION CATALOGO DE GASTO	FUENTE	REC	SIT	VALOR		VALOR PAGADO	VALOR REINTEGRADO		USO DE PROYECTOS ESPECIALES			
				PESOS	MONEDA	PESOS	PESOS	MONEDA EXTRANJERA	USO DE PROYECTO	MONEDA	TASA DE CAMBIO	VALOR MONEDA
012 ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA / A-02-02-02-008-003 SERVICIOS PROFESIONALES, CIENTÍFICOS Y TÉCNICOS (EXCEPTO LOS SERVICIOS DE INVESTIGACION, URBANISMO, JURÍDICOS Y DE CONTABILIDAD)												
	Nación	10	CSF	5.533.500,00	0,00	5.533.500,00				Pesos	0,00	0,00

DEDUCCIONES

POSICIONES DEL CATALOGO PARA PAGO NO PRESUPUESTALES		TERCERO		TARIFA	VALOR	VALOR AJUSTADO PAGO	VALOR REINTEGRADO
2-01-05-01-97	RETE-ICA-OTRAS CIUDADES-SERVICIOS	899999325	MUNICIPIO DE MADRID	1,000 %	55.335,00	55.335,00	

LINEAS DE PAGO VINCULADA

DEPENDENCIA PARA AFECTACION DE PAC	POSICION DEL CATALOGO DE PAC	FECHA	VALOR	ATRIBUTO LINEA DE PAGO	ESTADO
012 - ESCUELA DE SUBOFICIALES FUERZA AEREA	1-2 - ANC - GASTOS GENERALES NACION CSF	2026-10-06	5.533.500,00	40 BIENES, SERVICIOS, IMPUESTOS Y TRANSFERENCIAS CAUSADOS	Pagada

T1. ALEXANDRA CHAVEZ OVIEDO
TECNICO ESPECIALISTA EN TESORERIA