ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

**Título:** Diseño y fabricación de prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud con las armas originales.

**Trabajo de Integración Curricular**

**Autores:** León Mendoza, Josthin Leonel
Naranjo Villagomez, Jordy Elian

Director: Ing. Trujillo Jaramillo, José Guillermo.



# • Planteamiento del Problema

Dependencia de la ETFA de réplicas importadas, costosas y no siempre ajustadas a su armamento en dotación.
Cuatro Frentes del Problema:
**Diseño:** Inexistencia de un modelo digital paramétrico y planos de fabricación.
**Materiales:** Sin criterio técnico de selección; la resistencia queda al azar.
**Procesos:** Ausencia de comparación entre impresión 3D local vs. colada industrial.
**Seguridad:** Garantía de no-convertibilidad delegada a avisos y no a la geometría del objeto.

# Formulación y Objetivos

**Formulación del Problema:** ¿Qué combinación de diseño digital, materiales y procesos permite obtener prototipos de réplicas inertes que aseguren resistencia, seguridad y similitud para la ETFA?

**Objetivo General:** Diseñar y fabricar prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud.

**Objetivos Específicos:**

Desarrollar modelos y planos digitales CAD.

Construir los prototipos y realizar pruebas básicas de ensamblaje, resistencia y manipulación.

# Justificación del Proyecto

**Metodológica:** Se define una ruta cualitativa, descriptiva y aplicada con un protocolo de verificación escrito y repetible para evitar el "ensayo y error"

**Técnica:** Sustento de parámetros de fabricación en literatura científica publicada y no en criterios empíricos de taller.

**Institucional:** Transferencia a la ETFA de planos, modelos y bitácora para autonomía en reposición de repuestos; continuidad a las líneas de investigación de la ESPE.

# Alcance y Delimitación

**Entregables Concretos:** Modelo digital CAD (ensamblaje y explosionado) y prototipo físico verificado.

**Delimitación Geográfica y Temporal:** Instalaciones de ESPE y ETFA en Latacunga, Cotopaxi (mayo - septiembre 2026).

**Límites Expresos:**

No incluye mecanismos de disparo ni piezas adaptables a proyectiles.

No evalúa el impacto pedagógico sobre la instrucción.

Pruebas funcionales no destructivas (no se usan máquinas de ensayo estandarizadas).

# Estado del Arte — Antecedentes

**Internacionales:**

Colorado et al. (2023): Falta de reproducibilidad en impresión 3D exige bitácora estricta de parámetros.

Algarni & Ghazali (2021) / Rodríguez-Panes et al. (2018): Demuestran que el porcentaje de relleno y la altura de capa pesan más en la resistencia que la elección del propio filamento.

Wortmann et al. (2022): La colada de poliuretano solo se amortiza en producciones de gran volumen.

**Institucionales:**

Fonseca & Miranda (2018, ESPE): Antecedente directo en la sede sobre impresión 3D orientada a la resistencia mecánica.

# • Marco Teórico — Selección de Procesos

**Comparativa Técnico-Económica (FDM vs. Colada de Poliuretano en Silicona):**

| Criterio | FDM (Impresión 3D) | Colada en Molde |
|---|---|---|
| Costo inicial | Nulo (equipo disponible) | Alto (creación de molde maestro) |
| Control de Masa | Ajustable mediante patrón/relleno | Fijo por densidad de resina |
| Flexibilidad de Diseño | Rápida modificación en CAD | Requiere rehacer el molde |

**Conclusión:** Se selecciona FDM por bajo volumen requerido, facilidad de corrección y control de la masa.

# Marco Teórico — Seguridad Integral por Geometría

**Estrategias para Garantizar la Condición de Inerte:**

**Volumen Macizo / Estructura Ciega:** Eliminación de cavidades para alojamiento de mecanismos o munición.

**Incompatibilidad de Interfaces:** Ajustes que impiden acoplar piezas de un arma real.

**Coloración Definitiva:** Pigmentación integrada desde el filamento (no pintada), duradera ante el desgaste.

**Marcado Indeleble:** Identificación de "Material de Instrucción" integrada durante la fabricación.

# Marco Legal y Normativo

**Ley de Armas, Municiones y Explosivos (RO 680, nov 2024):**

Art. 5 (Arma de Fuego): El prototipo no posee cañón, mecanismo ni capacidad de disparar o transformarse.

Art. 5 (Réplica): No falsifica marcas comerciales ni está pensada para efectuar disparos.

**Ámbito Académico e Institucional:** Desarrollado bajo la modalidad de Trabajo de Integración Curricular (LOES) en convenio ESPE–ETFA.

# Metodología — Enfoque y Diseño

**Enfoque:** Cualitativo (selección teórica de parámetros y análisis interpretativo del comportamiento).

**Alcance:** Descriptivo y de finalidad aplicada.

**Diseño:** No experimental y de corte transeccional.

**Unidad de Análisis:** El conjunto del prototipo de réplica del fusil M4 y su bitácora de fabricación.

**Composición:** 12 piezas según el plano explosionado (cuerpo, guardamanos, culata, cargador, gatillo fijo, etc.).

# Parámetros y Configuración de Fabricación

Configuración Seleccionada para el Laminado:

**Proceso:** Deposición de Material Fundido (FDM).

**Material:** Ácido Poliláctico (PLA).

**Boquilla:** 0,4 mm | Altura de Capa: 0,2 mm.

**Porcentaje de Relleno:** 12 % | Patrón: Rectilindo.

**Soportes:** Empleados exclusivamente en zonas con voladizos.

# Protocolo de Pruebas Básicas.

Estructura del Protocolo Aplicado:

**Prueba de Ensamblaje:** Ajuste de interfaces, acople/desacople sin uso de fuerza excesiva ni herramientas.

**Prueba de Resistencia:** Inspección del estado físico tras someter el prototipo al manejo de instrucción previsto.

**Prueba de Manipulación:** Verificación dimensional táctil y medición de la masa total.

**Bitácora de Fabricación:** Vinculación directa entre el resultado y la configuración de impresión.

# Técnicas de Análisis de Datos

**Similitud:** Comparación en milímetros y % de desviación respecto a la documentación técnica del arma.

**Masa:** Cálculo derivado del consumo de filamento (descontando soportes) vs. masa de referencia del arma.

**Resistencia y Seguridad:** Verificación cualitativa mediante matriz de cumplimiento geométrico y funcional.

**Trazabilidad:** Organización de los datos en hojas de cálculo y capturas respaldadas de software laminador.

# Consideraciones de Seguridad y Rigor

Criterios de Rigor: Trazabilidad documental completa (archivos CAD, planos y capturas de laminado archivados).

## Limitaciones Declaradas:

Resultados aplicables al prototipo fabricado (sin inferencia estadística de variabilidad).

Verificaciones puramente funcionales (sin ensayos destructivos normados)

Seguridad: Objeto inerte verificado bajo entornos controlados de la ETFA.

# Entregable de Diseño Digital (CAD)

**Paquete Digital Completado:**

Modelo Paramétrico: Ensamblaje y 12 piezas individuales en formato nativo (SolidWorks) para modificaciones por cotas.

Intercambiabilidad: Exportación a formato STEP para uso en cualquier software CAD.

Documentación Técnica: Plano explosionado, orden de armado y lista de elementos (BOM).

**Composición del Conjunto (12 Piezas Inertes):**

Cuerpo principal (alberga empuñadura y cajones), culata, guardamanos (izq./der.), cargador, gatillo fijo, rack, side, indicador, tapa, pin y back.

Hallazgo en CAD: El modelo 3D inicial no tenía material asignado, por lo que la masa se determinó mediante el software laminador.

# Parámetros de Fabricación y Consumo de Material

**Configuración del Proceso (FDM):**

**Equipo y Filamento:** Creality K1 Max (boquilla 0.4 mm) | PLA marca Sunlu.

**Laminado:** Altura de capa: 0,2 mm | Relleno: 12 % (Patrón Rectilíneo).

**Consumo Real de Prototipado:**

**Tiempo total de máquina:** 23 horas con 15 minutos.

**Filamento consumido:** 699,92 g (242,48 metros, incluyendo soportes). Costo de material: 14,46 USD.

**Distribución de Masa:** El Cuerpo principal concentra el 53,5 % (374,46 g) de la masa total impresa.

# Análisis de Similitud — Desviación de Masa y Dimensiones

**Resultados de Similitud Dimensional:**

Longitud extendida: Prototipo 860 mm vs. Manual 997 mm ($\Delta$ 137 mm — pendiente de verificación directa en la unidad de dotación por variaciones de plataforma).

**Brecha de Masa (El Hallazgo Central):**

Masa del prototipo (sin cargador): 632,18 g.

Masa del arma real (referencia): 2.720 g.

Proporción alcanzada: El prototipo alcanza únicamente el 23 % de la masa real (Diferencia: 2.087,82 g).

Causa: Combinación de la baja densidad del polímero (PLA) frente al aluminio/acero del arma real, sumado al relleno interno mayormente hueco (12 %).

# • Simulación de Relleno (12 % vs. 40 %)

**Evaluación Virtual de Alternativa en Laminador:**

| Indicador | Relleno al 12 % (Fabricado) | Relleno al 40 % (Simulado) | Variación |
|---|---|---|---|
| Masa del Conjunto | 699,92 g | 1.010,00 g | +310 g (+44 %) |
| Tiempo de Impresión | 23 h 15 min | 29 h 49 min | +6 h 34 min |
| Costo de Material | 14,46 USD | 21,43 USD | +48 % |
| % de Masa del Arma Real | 25,7 % | 37,1 % | +11,4 puntos |

**Conclusión Técnica:** Incrementar el relleno no resuelve el problema de masa. La solución debe ser geométrica/estructural en la fase de diseño (p. ej., insertos de alta densidad) y no mediante ajustes en la máquina.

# Verificación de Seguridad y Protocolo de Pruebas

**Cumplimiento de Condición de Réplica Inerte (Seguridad):**

**Marcado Formado:** Grabado de "Material de Instrucción" / selector integrado directamente en el proceso de impresión 3D.

**Pigmentación:** Color del material integrado (sin pintura superficial que sufra desgaste).

**Estructura Ciega:** Ausencia de cavidades funcionales para munición o mecanismos.

**Estado del Protocolo de Pruebas Básicas:**

Quedaron completamente redactados e instrumentados los procedimientos para medir Ensamblaje, Resistencia y Manipulación.

Limitación del Proyecto: Las pruebas de campo no fueron ejecutadas dentro del periodo del estudio; quedan listas para aplicación inmediata por la ETFA.

# Conclusiones y Recomendaciones Clave

**Conclusiones Principales:**

Se entregó la autonomía técnica a la ETFA mediante el paquete CAD de 12 piezas y su bitácora de laminado.

Quedó demostrado cuantitativamente que el ajuste de parámetros de software (relleno) es insuficiente para alcanzar la masa del arma real.

**Recomendaciones para Trabajos Futuros:**

**Rediseño Estructural:** Incluir alojamientos para insertos metálicos/pesados en el modelo 3D para equiparar la masa.

**Asignación de Material en CAD:** Configurar las propiedades físicas del PLA en el software 3D para obtener cálculos automáticos de centro de gravedad.

**Validación Práctica:** Ejecutar la sesión de 30 minutos del Protocolo de Pruebas Básicas en la ETFA.