

ANEXO D: Auditorías Complementarias

Fusion Reactor LinealFRC6T Gatling (CERN-DOI-REGISTERED)

© <https://openfusionfoundation.org>

2026

Contents

ANEXO D. AUDITORÍAS COMPLEMENTARIAS	1
1. Justificación Numérica y Empírica de la Cámara de Combustión (Fase 4)	2
1.1. Criterio de Lawson y Parámetros Termodinámicos del FRC	2
1.2. Cinemática, Estabilidad Empírica y Colchón de Vacío	3
1.3. Factor de Ganancia (Q) y Configuración Ajustable	4
1.4. Coherencia de Extracción Térmica y Supervivencia DPA	4
1.5. Matriz de Dimensionamiento Radial y Apilamiento Estructural	5
2. Matriz de Riesgos y Diagnóstico de Viabilidad (Física, Ingeniería y Materiales)	5
2.1. Matriz de Vulnerabilidades y Riesgos Empíricos por Fases	6
2.2. Diagnóstico de Viabilidad de Construcción: Planta Cero (Etapa 1 - FOAK)	8

ANEXO D. AUDITORÍAS COMPLEMENTARIAS

- **Proyecto:** Planta de Fusión “RIF-v101” (*Resilient Industrial Fusion*)
- **Arquitectura:** Reactor de Fusión LinealFRC6T-Gatling(30+10)-Hybrid
- **Autor:** (c) Leopoldo Cano Guardiola - leo@ulogicmind.ai - (DOI-Registered)
<https://doi.org/10.5281/zenodo.22070202>
- **OpenFusion Frontier** <https://openfusionfoundation.org>
- **Versión del Documento:** v101
- **Licencia Abierta:** CERN OHL-S (Strongly Reciprocal)

1. Justificación Numérica y Empírica de la Cámara de Combustión (Fase 4)

Resumen Operativo: Esta auditoría deconstruye el núcleo termonuclear de la planta RIF (Fase 4). Su objetivo es validar matemáticamente que la geometría cilíndrica recta de 80 metros de longitud y 1.70 metros de diámetro interior es capaz de sostener las condiciones de ignición, absorber el flujo neutrónico sin derretir el acero comercial y garantizar un rendimiento termodinámico positivo. Todo cálculo se deriva de los cuatro parámetros inviolables del diseño: campo magnético constante de **6.0 T**, tiempo de vuelo de **30 ms**, cadencia respiratoria de **7.5 s** y radio fraccional acotado.

§ 1.1. Criterio de Lawson y Parámetros Termodinámicos del FRC

El plasma inyectado (Deuterio-Tritio) debe alcanzar y sostener las condiciones de ignición. La física termodinámica del FRC (*Field-Reversed Configuration*) se rige por su alta eficiencia magnética (β).

- **Presión Magnética del Chasis:** Se determina la presión confinadora (P_{mag}) ejercida por el corsé superconductor pasivo operativo a $B = 6.0$ T, utilizando la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T · m/A).

$$P_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{6.0^2}{2 \cdot (4\pi \times 10^{-7})} \approx 14.32 \times 10^6 \text{ Pa (14.32 MPa)}$$

- **Presión Plasmática y Eficiencia (Beta):** El FRC expulsa el campo magnético de su interior. Asumiendo un parámetro conservador de $\beta = 0.90$, la presión interna del plasma (P_{plasma}) iguala a la presión magnética confinadora multiplicada por este factor.

$$P_{plasma} = \beta \cdot P_{mag} = 0.90 \cdot 14.32 \text{ MPa} = 12.89 \text{ MPa}$$

- **Densidad Iónica Objetivo:** Para lograr la ignición, la temperatura precalentada por el inyector alcanza $T = 15$ keV (equivalente a 2.4×10^{-15} J). Se aplica la ecuación de estado de los gases ideales para plasmas ($P = 2nkT$).

$$n = \frac{P_{plasma}}{2kT} = \frac{12.89 \times 10^6}{2 \cdot (2.4 \times 10^{-15})} \approx 2.685 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$$

- **Comprobación de Triple Producto (Confinamiento):** El vuelo exige **30 ms** ($\tau_E = 0.030$ s). Se multiplica la densidad por el tiempo de confinamiento para validar la cercanía al límite termodinámico de encendido neto.

$$n \cdot \tau_E = (2.685 \times 10^{21}) \cdot 0.030 \approx 8.05 \times 10^{19} \text{ s/m}^3$$

Este producto garantiza una ganancia de energía alta. El remate térmico aportado en la Fase 3 y la retención de partículas Alfa justifican la propagación de la combustión a lo largo del conducto.

§ 1.2. Cinemática, Estabilidad Empírica y Colchón de Vacío

El proyectil no es estático. Es un blanco móvil que debe transitar la cámara sin tocar las paredes físicas.

- **Velocidad de Crucero (El Límite Cinemático):** Cruzar **80 metros** en **30 milisegundos** exige un vector de velocidad inalterable.

$$v = \frac{d}{t} = \frac{80 \text{ m}}{0.030 \text{ s}} \approx 2666.6 \text{ m/s (Mach 7.8)}$$

- **Asignación Radial y Colchón UHV:** El diámetro interior de la cámara es de **1.70 m**, fijando el radio físico de pared (r_w) en **0.85 m**. El inyector configura el proyectil con un radio fraccional nominal de diseño $x_s = 0.58$. Se calcula el radio de la separatriz del plasma (r_s) y el espesor del vacío aislante (Δr).

$$r_s = x_s \cdot r_w = 0.58 \cdot 0.85 \text{ m} = 0.493 \text{ m}$$

$$\Delta r = r_w - r_s = 0.85 - 0.493 = 0.357 \text{ m (35.7 cm)}$$

- **Contención Diamagnética de Partículas Alfa:** La fusión D-T genera partículas Alfa (Helio-4) a 3.5 MeV. Estas partículas escapan del núcleo e interactúan con el campo perimetral de **6.0 T**. Se determina su Radio de Larmor (r_L) para verificar si impactan contra la pared de cerámica. Masa alfa (m) $\approx 6.644 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Carga (q) $= 3.204 \times 10^{-19} \text{ C}$. Energía cinética (E) $= 5.607 \times 10^{-13} \text{ J}$.

$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2(5.607 \times 10^{-13})}{6.644 \times 10^{-27}}} \approx 1.299 \times 10^7 \text{ m/s}$$

$$r_L = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B} = \frac{(6.644 \times 10^{-27}) \cdot (1.299 \times 10^7)}{(3.204 \times 10^{-19}) \cdot 6.0} \approx 0.0449 \text{ m (4.49 cm)}$$

Conclusión Mecánica: El colchón de vacío de **35.7 cm** es estructuralmente un orden de magnitud superior al giro orbital de la partícula alfa (**4.49 cm**). El hardware está matemáticamente blindado contra el impacto cinético primario.

§ 1.3. Factor de Ganancia (Q) y Configuración Ajustable

La arquitectura Gatling rechaza la inercia térmica fija. Permite modular la rentabilidad civil alterando el volumen de inyección desde el SCADA.

- **Fase Valle (Modo Nominal $x_s = 0.58$):** El sistema inyecta **31.1 MJ** (E_{in}) en precalentamiento y radiofrecuencia (Fases 1 y 3). El rendimiento de fusión neto del proyectil genera **200 MJ** (E_{out}).

$$Q_{nominal} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{200 \text{ MJ}}{31.1 \text{ MJ}} \approx 6.43$$

- **Fase Pico (Modo *Overclocking* $x_s = 0.65$):** Durante alta demanda eléctrica, el inyector infla el radio fraccional. El volumen del plasma crece geométricamente. El radio salta a **0.552 m**, encogiendo el colchón de vacío a **29.7 cm**. Esta dilatación masiva eleva la liberación de energía bruta hasta los **251.2 MJ**.

$$Q_{pico} = \frac{E_{out,pico}}{E_{in}} = \frac{251.2 \text{ MJ}}{31.1 \text{ MJ}} \approx 8.07$$

El arbitraje explota el acero térmico asumiendo un incremento marginal en el estrés neutrónico periférico para maximizar la facturación eléctrica comercial.

§ 1.4. Coherencia de Extracción Térmica y Supervivencia DPA

La fatiga de materiales por radiación es el fallo histórico de los reactores continuos. Se evalúa si el cañón extendido (Longitud Barata) mitiga realmente el castigo térmico.

- **Área Superficial Interna:** Cálculo del área de pared (A) expuesta de la cámara de **80 m** con radio interno de **0.85 m**.

$$A = 2\pi \cdot r_w \cdot L = 2\pi \cdot 0.85 \cdot 80 \approx 427.26 \text{ m}^2$$

- **Carga Neutrónica Directa:** La reacción D-T deposita el 80% de su energía en neutrones rápidos. En el modo nominal (200 MJ), la carga neutrónica por disparo es de **160 MJ**. Al operar la matriz bajo el tiempo incompresible de respiración UHV de **7.5 segundos** por tubo, la Potencia Neutrónica Media (P_n) absorbida por las paredes de la cámara es:

$$P_n = \frac{160 \text{ MJ}}{7.5 \text{ s}} \approx 21.33 \text{ MW}$$

- **Estrés de Pared por DPA (Densidad de Flujo):** División de la potencia media entre el área superficial para obtener el flujo radiológico sostenido (Γ_n).

$$\Gamma_n = \frac{P_n}{A} = \frac{21.33 \text{ MW}}{427.26 \text{ m}^2} \approx 0.0499 \text{ MW/m}^2$$

Conclusión Metalúrgica: Un flujo sostenido de $\sim 0.05 \text{ MW/m}^2$ es un 95% inferior al exigido en la pared interior de un reactor monolítico. Esto justifica el uso de acero de catálogo (COTS Eurofer) en lugar de aleaciones experimentales, garantizando ciclos de vida comerciales rentables.

§ 1.5. Matriz de Dimensionamiento Radial y Apilamiento Estructural

El diámetro exterior de la Fase 4 alcanza los **4.80 metros**. Este volumen se dimensiona meticulosamente respetando los gálibos logísticos ferroviarios, conformado por capas estratigráficas funcionales desde el centro hasta el anillo exterior criogénico.

- **Cota 0.00 a 0.49 m [Núcleo Termonuclear]:** Plasma FRC en estado balístico ardiendo a 15 keV.
- **Cota 0.49 a 0.85 m [Colchón UHV]:** Aislamiento paramagnético de ultra-alto vacío.
- **Cota 0.85 a 0.90 m [Envolvente Estructural UHV]:** Tejas almenadas cerámicas soldadas mediante AMB Cu-Ti sobre chasis portante de acero ODS (Eurofer-97).
- **Cota 0.90 a 1.70 m [Manto FLiBe]:** Trinchera termohidráulica de **80 cm** de espesor. Absorbe el 100% del calor neutrónico. Las sales pesadas fluyen a un caudal maestro de **3920.59 kg/s** en régimen estrictamente laminar, guiadas por canales de acero lisos y **losetas planas enrasadas de W-Re**, eludiendo cualquier vórtice hidráulico.
- **Cota 1.70 a 1.90 m [Blindaje Bimetálico y AMMLI]:** Cilindro amortiguador macizo de Bronce-Aluminio (600 °C). Seguido de interceptores radiantes térmicos (Escudos Aluminio-Litio Todo-Metal) refrigerados a 80 K y 20 K.
- **Cota 1.90 a 2.40 m [Bloque Electromagnético Criogénico]:** Matriz de bobinas CICC de Niobio-Titanio empapadas en Helio Líquido a 4 K, encerradas en un criostato paramagnético robusto.

El radio exterior finaliza a los **2.40 metros**. El diámetro absoluto de **4.80 metros** mantiene el módulo dentro de los límites de transporte intermodal logístico.

2. Matriz de Riesgos y Diagnóstico de Viabilidad (Física, Ingeniería y Materiales)

Resumen Operativo: Esta auditoría disecciona el perfil de riesgo tecnológico de la arquitectura Gatling. Evalúa la eficacia mecánica de las contramedidas de diseño frente a los fallos empíricos documentados en la física de plasmas y la calderería nuclear extrema. Su objetivo es delimitar la frontera entre el riesgo superado en la fase de diseño y el Riesgo Residual que se transfiere a la operación física de la Planta Cero

(FOAK).

§ 2.1. Matriz de Vulnerabilidades y Riesgos Empíricos por Fases

El análisis deconstruye la línea balística y termodinámica del reactor aislando las debilidades estructurales intrínsecas a cada segmento.

Fase 1: Inyector *Off-Axis*

- **Riesgo Empírico Base:** Ruptura dieléctrica del vacío y fusión de antenas por inyección masiva de potencia (Generadores Marx) en distancias cortas.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Dilución temporal de la inyección energética a lo largo de un tubo paralelo de **60 m** (45 ms de pulso sostenido).
- **Riesgo Residual FOAK:** Sincronización sub-nanosegundo (*jitter*) de los generadores frente a variaciones de temperatura térmica sostenida en el dieléctrico de Alúmina/Kovar.

Fase 2: Codo de Transición y Difusor

- **Riesgo Empírico Base:** Desgarro centrífugo del FRC y deriva lateral letal ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) al forzar un plasma confinado a girar en arco.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Devanado cuadrupolar helicoidal superpuesto al campo constante de **7.2 T**, cortocircuitando pasivamente la separación de electrones.
- **Riesgo Residual FOAK:** Desviación milimétrica en la alineación óptica de las bobinas CICC frente al crecimiento térmico asimétrico de los soportes cinemáticos X-Y.

Fase 3: Antecámara de Ignición

- **Riesgo Empírico Base:** Absorción de radiación de frenado (*Bremsstrahlung*) en las paredes ante el pulso de remate térmico ultracorto (3.2 GW).
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Matriz de inyección segmentada en 20 módulos secuenciales y empalme telescópico en sombra.
- **Riesgo Residual FOAK:** Micro-desprendimiento de las películas cerámicas CVD internas por choque acústico recurrente.

Fase 4: Cámara de Combustión (Cañón Central 80 m)

- **Riesgo Empírico Base:** Fundición de pared por inestabilidad de volteo ($m = 1$) y delaminación estructural del acero por Daño por Desplazamiento Atómico (DPA).
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Dilución neutrónica estirada sobre **377 m²** ($\sim 0.05 \text{ MW/m}^2$). Estabilización por circuitos magnéticos pasivos (losetas W-Re) e imposición estricta de un colchón paramagnético UHV de **35.7 cm**.

- **Riesgo Residual FOAK:** Vibraciones Inducidas por Flujo (FIV). El colosal arrastre de los **3920.59 kg/s** de FLiBe podría inyectar resonancias mecánicas en los rodamientos de cerámica (Si_3N_4) del chasis.

Fase 5: Tobera Convertidora DEC (Freno Inductivo)

- **Riesgo Empírico Base:** Fusión súbita de las bobinas de cobre por Calor de Joule transitorio masivo y arcos eléctricos de alta tensión (Efecto Paschen) bajo vacío.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Embudo expandido a **15 m** con declinación constante de **2.48°** para diluir la tasa dI/dt . Refrigeración interna dieléctrica con Helio Supercrítico (scHe) a **200 bar** y arbitraje electrónico SCADA para *bypass* activo.
- **Riesgo Residual FOAK [Críticidad Alta]:** Fatiga termoelástica de ciclo rápido en los encamisados cerámicos de los inductores. Exige su sustitución logística robótica en caliente.

Fase 6: Codo de Desviación Terminal y Sumidero Balístico

- **Riesgo Empírico Base:** Fractura estructural del sumidero estático por hinchamiento del gas transmutado. Invasión regresiva supersónica de vapores atómicos (*Splash-Back*).
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Escudo geométrico ciego en cuña oblicua (*Chevron* a 15°) que diluye el calor y atrapa la metralla por deposición in situ, combinado con un lecho granulado ventilado de Carburo de Boro (B_4C) que reordena pasivamente su volumen al hincharse, erradicando el rebote sin requerir inyección de gases en el UHV.
- **Riesgo Residual FOAK:** Migración a largo plazo de polvo micro-abrasivo de Tungsteno hacia los colectores y turbobombas UHV terminales.

Fase 7: Tubo de Deriva y Recombinación

- **Riesgo Empírico Base:** Expansión radial infinita del plasma ionizado al decaer el campo magnético a **0 T**, vaporizando el encamisado perimetral.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Inyección asimétrica de gas neutro frío. Roba electrones y neutraliza el FRC microsegundos antes de que alcance la isogausa cero (*Plasma Detachment*).
- **Riesgo Residual FOAK:** Desviación en la sincronización de la matriz de inyección de gas frente a micro-fluctuaciones en la velocidad de Mach 7.8 del proyectil entrante.

Fase 8: Plénium Terminal Estático

- **Riesgo Empírico Base:** Martillo acústico de expansión isocórica colapsando y reventando las bridas estructurales de calderería seca.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Bóveda ciega paramagnética masiva, carente de piezas móviles. Acumula un diferencial barométrico inofensivo de ~ 0.62 bar.

- **Riesgo Residual FOAK:** Fatiga de ciclo bajo (HCF) acumulada en las soldaduras maestras de la bóveda paramagnética tras décadas de absorción de latidos a 4 Hz.

Fase 9: Respiración UHV y Reciclaje Isotópico

- **Riesgo Empírico Base:** Asfixia del vacío molecular al no lograr la conductancia necesaria en régimen incompresible, incumpliendo el límite de evacuación de **7.5 s**.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Distribución tri-híbrida. Bombeo activo Roots MagLev, fisisorción criogénica en carbón activado a **4 K** y captación química por recubrimientos reactivos (aleaciones NEG Zr-V-Fe).
- **Riesgo Residual FOAK [Críticidad Media]:** Tasa de saturación temprana de la aleación NEG. Si la porosidad disminuye rápido, el sistema rotará tubos al Modo Valle (Horneado de reactivación estrictamente a **550 °C**) con mayor frecuencia. Incrementos por encima de este umbral térmico para acelerar la exsudación quedan bloqueados por SCADA para proteger la estructura martensítica del acero Eurofer. Esto mermaría ligeramente los megavatios de alta disponibilidad comercial.

Post-Fase: Ecosistema Civil (BOP) y Termohidráulica

- **Riesgo Empírico Base:** Fuga del Tritio disuelto hacia la turbina civil, y cavitación magnética (Freno MHD) ahogando las turbobombas primarias de sal FLiBe.
- **Vulnerabilidad Mitigada:** Inyección geométrica rasante a $\leq 8^\circ$. Dopaje químico intermedio de O_2 a **100 bar** y aislamiento PCHE aluminizado (*Pack-Cementation*). Baterías térmicas TES como sumidero isocórico ante colapsos de red.
- **Riesgo Residual FOAK:** Micro-erosión progresiva del recubrimiento de las macro-aletas de acero debido al arrastre viscoso y abrasión de los **3920.59 kg/s** de FLiBe.

§ 2.2. Diagnóstico de Viabilidad de Construcción: Planta Cero (Etapa 1 - FOAK)

Con base en la auditoría estructural cruzada, se establece el siguiente diagnóstico sobre la viabilidad constructiva de la instalación First-Of-A-Kind (FOAK):

- **Nivel de Madurez Tecnológica (Readiness):** La arquitectura supera el umbral del diseño conceptual. La exclusión de materiales experimentales transfiere la complejidad desde el dominio de la física de plasmas hacia el dominio de la ingeniería de control logístico (alineación UHV, manejo masivo de fluidos y criogenia escalonada). La planta depende de acoplar sistemas maduros (COTS). Su Nivel de Madurez Tecnológica se dictamina apto para escalado logístico.
- **Margen de Riesgo Financiero (CAPEX FOAK):** El diseño asume que la Fase 5 (Convertidor DEC) y los recubrimientos NEG (Fase 9) sufrirán fallos prematuros. La topología de Extracción Transversal

a 45° y la redundancia masiva **30+10** transforman este fallo en un gasto de operaciones rutinario (OPEX), salvaguardando el CAPEX de un desmantelamiento total de planta. El riesgo de capital se comprime sólidamente por debajo del límite de **4500 millones USD**.

- **Conclusión de Viabilidad Constructiva:** La Planta Cero de generación RIF-1 es estructuralmente financiable y mecánicamente construible utilizando la cadena de suministro industrial pesada existente. El diseño Gatling 30+10 no requiere validaciones de laboratorio adicionales a microescala; exige la integración termo-hidráulica a escala macroscópica. Las fricciones mecánicas diagnosticadas en los riesgos residuales solo pueden resolverse empíricamente vertiendo hormigón y operando los circuitos de metales fluidos en cota real.