

ANEXO A: Detalles de Ingeniería Fases 1-9 del Reactor

Fusion Reactor LinealFRC6T Gatling (CERN-DOI-REGISTERED)

© <https://openfusionfoundation.org>

2026

Contents

ANEXO A. Ingeniería Detallada: Análisis de Fases del Reactor.	2
RESUMEN VISIÓN GLOBAL DEL Reactor LinealFRC6T	3
Visión Global I: La Forma (Arquitectura Espacial y Traza Geométrica en Planta)	3
Visión Global II: El Funcionamiento (Cronología del Vuelo Termonuclear y Perfil Magnético)	4
FASE 1 (Inyector Off-Axis) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	6
1. Resumen Operativo y Misión Física	6
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	6
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	7
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	9
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	10
FASE 2 (Codo de Transición y Difusor Rectilíneo) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	13
1. Resumen Operativo y Misión Física	13
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	13
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	14
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	15
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	16
FASE 3 (Antecámara de Ignición) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	18
1. Resumen Operativo y Misión Física	18
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	19
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	19
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	20
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	21
FASE 4 (Cámara de Combustión) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	23
1. Resumen Operativo y Misión Física	23
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	24
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	24
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	26
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	27
FASE 5 (Tobera Convertidora DEC) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	31
1. Resumen Operativo y Misión Física	31
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	31
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	32
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	34
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	35

FASE 6 (Codo de Desviación Terminal y Sumidero Balístico) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	38
1. Resumen Operativo y Misión Física	38
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	38
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	39
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	40
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	41
FASE 7 (Tubo de Deriva) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	43
1. Resumen Operativo y Misión Física	43
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	44
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	45
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	46
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	47
FASE 8 (Plenum Terminal) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	49
1. Resumen Operativo y Misión Física	49
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	49
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	50
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	51
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	51
FASE 9 (Ecosistema de Respiración UHV y Reciclaje Isotópico) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales	53
1. Resumen Operativo y Misión Física	53
2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)	53
3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)	54
4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras	55
5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones	56
AUDITORÍA DE COHERENCIA: Análisis de Coherencia y Continuidad entre Fases	58
1. Transferencia Fase 1 → Fase 2 (Inyector Off-Axis a Codo de Transición)	58
2. Transferencia Fase 2 → Fase 3 (Difusor Rectilíneo a Antecámara de Ignición)	58
3. Transferencia Fase 3 → Fase 4 (Antecámara de Ignición a Cámara de Combustión)	59
4. Transferencia Fase 4 → Fase 5 (Cámara de Combustión a Tobera Convertidora DEC)	59
5. Transferencia Fase 5 → Fase 6 (Tobera Convertidora a Chicane Cortafuegos)	60
6. Transferencia Fase 6 → Fase 7 (Chicane Cortafuegos a Tubo de Deriva)	60
7. Transferencia Fase 7 → Fase 8 (Tubo de Deriva a Plenum Terminal)	61
8. Transferencia Fase 8 → Fase 9 (Plenum Terminal a Ecosistema de Respiración)	61

ANEXO A. Ingeniería Detallada: Análisis de Fases del Reactor.

- **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)

RESUMEN VISIÓN GLOBAL DEL Reactor LinealFRC6T

El Tubo FRC ejecuta la combustión termonuclear a través de una macro-geometría en “S-estirada” dividida en 9 fases físicas continuas más una Post-Fase civil. El plasma nace en un eje desplazado en ángulo de 21° , toma una curva ciega para proteger al inyector de la radiación, se estabiliza, entra en ignición y recorre un inmenso cañón recto. Al final, se expande para entregar electricidad pura, toma otra curva ciega inversa para estrellar su metralla contra un muro pasivo, y disipa su energía final en un plénium de calderería estática y seca, permitiendo a las bombas periféricas limpiar el tubo en 7.5 segundos exactos.

§ Visión Global I: La Forma (Arquitectura Espacial y Traza Geométrica en Planta)

La ruta balística total cubre **218.88 metros**, pero gracias a sus curvas tácticas, la huella lineal neta de la planta se comprime a **185 metros**, con la siguiente forma y geometría:

- **Origen (Fase 1):** Tramo recto de **60 m**. El inyector opera desplazado lateralmente respecto a la línea de tiro principal, dispuesto en un **eje convergente diagonal**. Avanza apuntando hacia el eje central con un ángulo estricto de **21.28°** en el plano del suelo.
- **Primera Inflexión (Fase 2):** Curva suave de **13 m** de longitud (con radio de **35 m**). Absorbe la convergencia diagonal y alinea el plasma exactamente con el eje principal. Aporta el desplazamiento lateral final de **2.39 m**, garantizando que los neutrones no puedan viajar en línea recta hacia atrás. Le sigue un difusor recto de **7 m**.
- **Eje Balístico Principal (Fases 3, 4 y 5):** Recta absoluta e ininterrumpida de **105.50 m** (**10 m** de ignición, **80 m** de cañón de vuelo y **15.50 m** de tobera expansiva DEC).
- **Segunda Inflexión Inversa (Fase 6):** Codo terminal de **13.38 m** (con radio de **25 m** y ángulo de **30.6°**). Gira en sentido opuesto a la primera inflexión. Provoca un desplazamiento lateral de **3.50 m**, bloqueando cualquier línea de visión directa de la metralla o la luz térmica desde el final del tubo hacia el cañón.
- **Sumidero Terminal (Fases 7 y 8):** Tramo recto final de **20 m** (**15 m** de deriva hueca y **5 m** de bóveda estática de cierre). Discurre en un eje divergente diagonal estabilizado tras la curva.

Boceto Visual 2D (Vista en Planta / Desde Arriba, omitiendo tramos curvos):

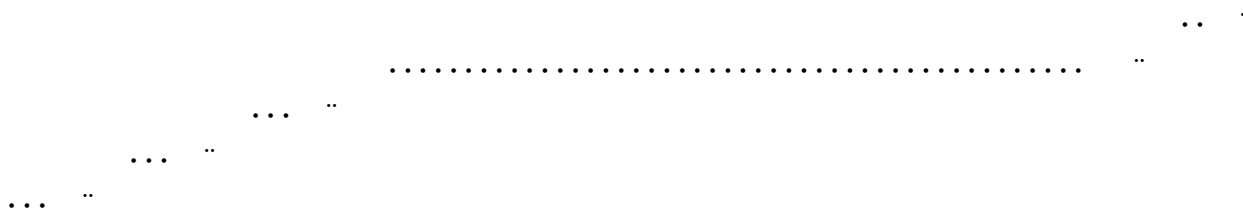
- **Tramo Izquierdo (Inyector):** Línea recta diagonal convergente de **60 metros**. Se acerca al eje central con un ángulo de **21.28°** sobre el nivel del suelo.
- **Tramo Central (Cañón):** Línea recta longitudinal de **105 metros**.

- **Tramo Derecho (Terminal):** Línea recta diagonal divergente de **20 metros**. Se aleja del eje central con un ángulo de **30.6°** sobre el nivel del suelo.

[Inyector: 60m]

[Cañón Central: 105.50 m]

[Terminal: 20m]



§ Visión Global II: El Funcionamiento (Cronología del Vuelo Termonuclear y Perfil Magnético)

Para comprender la interacción de las nueve fases descritas a continuación es conveniente visualizar primero de forma conjunta y unificada la coreografía balística y magnética de un único proyectil transiéndolo por los 185 metros de la máquina en apenas **una décima de segundo (aprox. 110 milisegundos)**. Las variaciones de intensidad en el corsé magnético dictan minuciosamente cada cambio termodinámico del flujo a lo largo de esta línea temporal: desde su forja y aceleración inicial, pasando por una ventana estricta de combustión termonuclear de **30 milisegundos**, hasta su frenada inductiva de **6 milisegundos** y su desintegración aerodinámica final.

- **1. Nacimiento y Forja Cinética (Fase 1):** El ciclo arranca en la recámara del inyector diagonal. Una descarga eléctrica ioniza el gas Deuterio-Tritio en ultra-alto vacío, y las fuerzas magnéticas locales lo moldean inmediatamente en un toroide cerrado (un “anillo de humo” electromagnético autoconfinado denominado FRC). Mientras el anillo nace, cañones de inyección neutra (NBI) le transfieren un momento angular colosal, dotándolo de una “coraza giroscópica” que impedirá que se voltee durante su vuelo. Acto seguido, una ola magnética peristáltica exterior exprime radialmente al plasma e incrementa la intensidad del campo base desde un umbral blando hasta un corsé crítico de **7.2 T**. Esta rampa magnética acelera al proyectil, lanzándolo por el corredor a una velocidad supersónica de **2666 m/s** (Mach 7.8) y precalentándolo por compresión pasiva hasta los **12 keV**. Todo ocurre fuera del eje visual del núcleo para proteger el hardware de la radiación directa.
- **2. Tránsito Ciego y Remate Térmico (Fase 2 y 3):** Volando a Mach 7.8, el proyectil alcanza el primer codo de transición (Fase 2) sosteniendo sus **7.2 T**. Para evitar que la fuerza centrífuga estrelle los iones, un devanado cuadrupolar helicoidal superpone un campo transversal que retuerce las líneas de fuerza, guiando al plasma suavemente por la curva. En esta inflexión se produce el blindaje geométrico clave de la planta: los neutrones regresivos altamente destructivos —que se originan aguas abajo en la cámara de combustión y viajan de frente hacia el inyector— ignoran el campo magnético, continúan su trayectoria recta absoluta y se entierran inofensivamente en el muro ciego de Tungsteno y guijarros de **B₄C**. Superada la curva protectora, el conducto ensancha su calibre de **1.20 m a 1.70 m**, permitiendo que las bobinas disminuyan el campo de forma controlada desde los **7.2 T** hasta los **6.0 T**. Este gradiente magnético descendente opera como una **tobera mag-**

nética pasiva: al ser diamagnético, el plasma es expulsado de la zona de alta presión magnética y recibe un “empuje” hacia adelante, compensando la fricción de la expansión radial y garantizando que mantenga inmaculada su velocidad supersónica. Aunque esta expansión exige un leve peaje de enfriamiento adiabático, la Antecámara de Ignición (Fase 3) recibe el anillo bajo el nuevo régimen plano de **6.0 T** y salda la deuda térmica inyectando un latido electromagnético invisible (ICRH) de **3.2 GW**. Sin añadir nueva masa, el plasma absorbe la radiofrecuencia y su temperatura salta súbitamente a los **15 keV** definitivos de ignición, justo a tiempo para ingresar en el horno principal.

- **3. Ignición y Combustión Balística (Fase 4):** El anillo, en estado de fusión nuclear total, ingresa al cañón recto principal de **80 metros**. A lo largo de esta galería, el corsé magnético se sostiene de forma rígidamente plana a **6.0 T**, actuando como un raíl magnético axial e inmutable. El plasma flota centrado en el vacío, preservando un colchón de seguridad de **35.7 cm** respecto a las paredes. Si el FRC sufre una oscilación milimétrica, su propio campo corta las **losetas de Tungsteno-Renio incrustadas en los canales de acero**; por pura ley de Lenz, se induce una fuerza magnética repulsiva pasiva que devuelve instantáneamente al proyectil al eje óptico. Mientras quema, libera un huracán continuo de neutrones rápidos que atraviesan la pared y son absorbidos por un río envolvente de sal líquida (FLiBe) a **600 °C**. Este disparo unitario deposita una carga calórica de **~26.6 MWth** en la sal que, al sumarse en el colector común con el flujo del resto de tubos Gatling, conforma la gran caldera maestra de **800 MWth** agregados para las turbinas civiles extramuros.
- **4. Cosecha Electromagnética y Criba Balística (Fase 5 y 6):** Agotado su ciclo útil pero manteniendo su inercia supersónica, el plasma accede a la tobera convertidora (Fase 5). Para blindar la junta elástica exterior contra la dilatación térmica de la calderería, el campo se mantiene estancado a **6.0 T** a lo largo de los primeros 0.50 m del collarín cilíndrico. Inmediatamente después, las bobinas reducen forzosamente el campo perimetral hasta un umbral estricto de **0.75 T** en la boca de salida, en perfecta sincronía con una divergencia aerodinámica de las paredes a **2.48°**. Esta caída drástica del campo obliga al plasma a expandirse diamagnéticamente hasta ocupar **1.40 m** de radio útil, rozando mecánicamente la jaula perimetral de cobre. Por pura ley de Lenz, el paso de este “imán” de plasma a Mach 7.8 induce una fuerza electromotriz inversa que extrae directamente el 60% de su energía cinética en forma de electricidad pura de corriente continua, desacelerando el flujo a **1686 m/s** y provocando un desplome térmico adiabático profundo. El flujo iónico residual, ya frío, accede a la Fase 6 a **0.75 T** y decae suavemente hasta los **0.50 T**. Los imanes y un devanado cuadrupolar resistivo curvan el haz cargado **30.6°** hacia la salida lateral, mientras que la metralla atómica neutra ignora el magnetismo, vuela recta y se destruye inofensivamente contra el sumidero de tungsteno inclinado a **15°**.
- **5. Neutralización y Cierre de Ciclo (Fase 7, 8 y 9):** El flujo de iones purificados ingresa al tubo final de deriva (Fase 7). Si el plasma cargado avanzara pasivamente hacia una zona sin campo, las leyes de conservación transversal provocarían una divergencia radial explosiva e infinita al tender los Teslas a cero. Para evitar el colapso del conducto, exactamente en la frontera de transición (el “milímetro cero”, donde el campo aún sostiene los **0.50 T** residuales), una matriz anular inyecta una cortina supersónica de Helio gas frío. Mediante recombinación volumétrica instantánea, los iones capturan electrones del Helio y pierden su carga eléctrica. Al despojarse de su carga, el fluido eje-

cuta el desprendimiento magnético (*Plasma Detachment*): pierde su memoria magnética e ingresa con total docilidad aerodinámica en la caída definitiva a **0 T** de la galería paramagnética. El flujo transiciona hacia un gas neutro tibio que se expande libremente por los **106 m³** huecos del tubo, amortiguando la onda de presión sónica hasta impactar contra el domo semiesférico de la Fase 8. Con la presión estabilizada a **0.62 bar**, la ausencia total de campo (**0 T**) y voltaje (**0 V**) imposibilita la ruptura dieléctrica de Paschen, protegiendo la calderería. Finalmente, en este entorno paramagnético inmutable, la colosal red perimetral de turbobombas MagLev de la Fase 9 succiona el gas sin experimentar destructivas fuerzas de frenado por corrientes de Foucault. El sistema separa las cenizas de Helio-4 a **4 K** y purifica el combustible mediante membranas de Paladio-Plata a **400 °C**, reinyectándolo al inyector inicial en un límite estricto de **7.5 segundos**. El reactor queda restaurado a su prístina línea base de **10⁻⁸ Torr**, transparente y listo para el siguiente disparo Gatling.

FASE 1 (Inyector Off-Axis) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 1 actúa como la recámara y el cañón acelerador del sistema. Su misión es generar el anillo de plasma (FRC), precalentarlo dócilmente e inyectarlo a velocidad supersónica hacia la curva principal. Opera como una larga pista de despegue situada a nivel de suelo (cota cero), pero en un **eje convergente diagonal**. Aprovecha su inmensa longitud y el tiempo previo al vuelo balístico para inyectar la mayor parte de la energía térmica inicial. El proyectil nace desplazado lateralmente para que sus delicadas antenas queden ocultas del daño directo por línea de visión frente a la radiación neutrónica que retrocede desde el núcleo.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para mantener la continuidad termodinámica y balística del reactor, este módulo opera bajo las siguientes fronteras paramétricas:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Gas inyectado neutro compuesto por mezcla isotópica pura Deuterio-Tritio.
- **Velocidad:** **0 m/s** (estado de reposo inicial en válvulas dosificadoras).
- **Temperatura inicial:** Entorno frío criogénico y térmico ambiental.
- **Presión base:** Ultra-alto vacío prístino a **10⁻⁸ Torr**.
- **Campo magnético base:** Régimen estático de soporte a **0.5 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC estructurado, cerrado y con cohesión magnética interna.
- **Velocidad de crucero:** Aceleración balística culminada a **2666 m/s**.
- **Temperatura final:** Régimen de pre-ignición estabilizado a **12 keV**.
- **Presión entregada:** Vacío preservado, arrastre de gas neutro eliminado.
- **Campo magnético terminal:** Compresión electromagnética a **7.2 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

El Inyector asume una macro-geometría recta diseñada para acoger el crecimiento y aceleración gradual del plasma, integrada enteramente mediante tecnología COTS.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones Base:** El tubo presenta una longitud ininterrumpida de **60 m**. Su diámetro interior se establece en **1.20 m** y el diámetro exterior consolida un volumen de **2.50 m** (incluyendo el blindaje local y las bobinas de compresión).
- **Orientación Espacial (Convergencia Plana Estricta):** Todo el sistema se despliega rígidamente nivelado sobre el plano horizontal de la planta (cota cero). Para empalmar con la curva del codo posterior y lograr el desplazamiento lateral de **2.39 m**, el inyector discurre con un ángulo de convergencia horizontal de **21.28°** respecto al eje óptico del cañón central. Este encaje en el plano X-Y garantiza un acoplamiento isométrico sin escalones y asegura la sombra geométrica absoluta de las antenas frente al núcleo.
- **Control de Dilatación (Crecimiento Regresivo Frontal):** Para evitar que el tubo de 60 metros empuje y desalinee la curva de la Fase 2 al dilatarse térmicamente, la brida de empalme final se ancla rígidamente al suelo operando como estator. Esto obliga al Inyector a crecer “marcha atrás”. El chasis desliza sobre sus raíles diagonales a **21.28°**, empujando su cola ciega varios centímetros hacia el pasillo logístico sin alterar jamás el eje óptico del disparo hacia el núcleo.

Mecanismo de Extracción Robótica:

- **Segmentación:** La fase de **60 m** se fragmenta mecánicamente en cuatro cartuchos modulares estandarizados de **15 m** de longitud cada uno.
- **Protocolo de Sustitución Terrestre:** Ante una avería, el SCADA aísla el tubo mediante válvulas de corredera UHV. Los tensionadores hidráulicos liberan las bridas perimetrales. Al estar todo el reactor nivelado, una plataforma ferroviaria automatizada se acopla al módulo. Lo retira axialmente deslizándolo sobre los raíles del suelo a lo largo de su corredor diagonal estricto de **21.28°**, y lo transfiere al pasillo logístico principal a **45 grados** hacia la Celda Caliente. El recambio se ejecuta de forma puramente bidimensional.

Desglose Funcional de los Cuatro Cartuchos Modulares:

- **Cartucho 1: Forja Estática, Inyección NBI y Pre-Ionización (Metros 0 a 15):** Es el único sector donde el plasma se mantiene cuasi-estático. Agrupa las válvulas piezoeléctricas de gas Deuterio-Tritio, las antenas de ruptura dieléctrica de Alúmina y los cañones tangenciales de **Haces Neutros (NBI)**. Esta fase ensambla la coraza giroscópica de iones rápidos. Incluye una bancada masiva de turbobombas MagLev ortogonales para evacuar la estela de gas neutro en milisegundos, despejando la pista a **10^{-8} Torr**. Cuenta además con anillos macizos de Tungsteno para la polarización electrostática (*Edge Biasing*).
- **Cartuchos 2, 3 y 4: Matriz de Aceleración y Compresión Dinámica Acoplada (Metros 15 a 60):** > *Nota de Manufactura:* Aunque funcionalmente operan como un único cañón electromagnético ininterrumpido de **45 m**, la zona se ensambla acoplando **tres cartuchos clónicos de 15 m**. Esta fragmentación es estrictamente logística. Subordina la calderería pesada a los límites de transporte ferroviario estándar COTS y permite la sustitución robótica sectorial en Celda Caliente sin requerir naves de mantenimiento de escala desproporcionada. > Forjados íntegramente en superaleación no magnética **MP35N** sin ventanas cerámicas. Están revestidos por un denso array de bobinas pulsantes helicoidales. Generan una “ola peristáltica” que empuja el FRC hacia adelante. El campo base aumenta su intensidad rígidamente desde **0.5 T** (metro 15) hasta culminar en **7.2 T** (metro 60). El proyectil es acelerado a **2666 m/s** y aplastado radialmente (alcanzando **12 keV**) de forma simultánea.

Matriz de Componentes (BOM) Actualizada:

- **Ventanas de Radiofrecuencia (Primera Capa):** Tramos cilíndricos estructurales confinados al Cartucho 1, forjados en **Alúmina** de alta pureza. Este material cerámico proporciona resistencia mecánica frente al vacío, garantizando transparencia absoluta al paso de las ondas electromagnéticas.
- **Cañones NBI Tangenciales:** Aceleradores de partículas estáticos acoplados exclusivamente al blindaje del Cartucho 1. Inyectan átomos neutros que transmutan a iones rápidos al chocar con el plasma naciendo, aportando el momento angular necesario para el vuelo de **80 m**.
- **Juntas de Transición (Anillos):** Acoplamientos de expansión forjados en aleación **Kovar** (Fe-Ni-Co) que unen la cerámica con los extremos metálicos. Su coeficiente de dilatación térmica iguala al de la alúmina, evitando la fractura por cizalladura interfacial.
- **Chasis Estructural No Magnético:** Utilizado como cuerpo principal en los Cartuchos 2, 3 y 4. El tubo de vacío se forja sin costuras en superaleación **MP35N** (Ni-Co-Cr-Mo). Aporta una resistencia colosal a la tracción y resulta químicamente inmune a la hidruración destructiva por contacto con el Tritio.
- **Electrodos Estáticos:** Anillos macizos de **Tungsteno** alojados en el interior del Cartucho 1, conectados a fuentes de alimentación de alto voltaje extramuros para la polarización de bordes.
- **Bobinas Peristálticas Pulsantes:** Devanados de cobre resistivo hueco, enfriados por agua desion-

izada en circuito cerrado. Gobernadas por interruptores de estado sólido IGCT, empujan y estrujan diamagnéticamente el FRC a lo largo de los últimos 45 metros del inyector.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La aceleración y el calentamiento del anillo FRC en esta etapa no dependen de explosiones mecánicas. El sistema confía enteramente en el trabajo electromagnético progresivo. El cañón del inyector transfiere energía térmica para elevar la temperatura y energía cinética para la traslación de forma controlada.

Para elevar el plasma hasta el régimen base de **12 keV**, el sistema debe depositar una energía de precalentamiento aproximada de **25 MJ** dentro del volumen del fluido. Suministrar esta inmensa carga térmica de golpe destruiría los aislantes cerámicos por arco eléctrico. Al estirar la aceleración dinámica a lo largo de los **45 m** de los cartuchos 2, 3 y 4, el tiempo de transferencia termocinética se prolonga a **~33.75 ms**. La energía térmica total acumulada se deriva del balance de presiones:

$$E_{th} = 3n_i V_p k T_i$$

A partir de este inventario, el requerimiento de potencia media de inyección se rige de forma estricta por la tasa de transferencia temporal durante la ola de compresión:

$$P_{iny} = \frac{E_{th}}{t_{acel}}$$

Sustituyendo los valores del óptimo industrial para la planta RIF, la ecuación consolida el balance de potencia:

$$P_{iny} = \frac{25 \times 10^6 \text{ J}}{0.03375 \text{ s}} \approx 740,740,740 \text{ W} \approx 740.7 \text{ MW}$$

Entregar **~740 MW** distribuidos a lo largo de **33.75 ms** constituye un esfuerzo técnico manejable para los bloques de tiristores IGCT de catálogo. Al carecer de ventanas cerámicas en estos 45 metros, la energía no se inyecta mediante ondas de radiofrecuencia (las cuales rebotarían contra el metal). La potencia se entrega en forma de **trabajo mecánico por compresión magnética (inducción pura)**. Las bobinas peristálticas aplastan el plasma radialmente; por pura termodinámica adiabática, el gas se calienta hasta los **12 keV**, eludiendo cualquier riesgo de ruptura dieléctrica en el vacío.

Paralelamente al calentamiento, el plasma experimenta una aceleración longitudinal continua. **El cañón mantiene un diámetro cilíndrico estricto y recto.** Las bobinas helicoidales exteriores aumentan secuencialmente su amperaje de atrás hacia adelante. Esta asimetría eléctrica estrecha las líneas de flujo dinámicamente, creando una “ola” magnética que empuja diamagnéticamente al FRC como un proyectil sobre un riel invisible sin generar un muro estático frontal. La fuerza magnetohidrodinámica axial que impulsa la masa se calcula integrando las corrientes inducidas:

$$F_z = \int_{V_p} j_\theta B_r dV$$

Donde F_z es la fuerza total de empuje longitudinal, j_θ representa la densidad de corriente azimutal auto-generada por el efecto de campo invertido dentro del plasma y B_r es el componente radial del gradiente del campo magnético exterior del chasis.

Esta fuerza acelera de forma constante la finísima masa de miligramos del fluido a lo largo de la galería horizontal. El impulso mecánico se calibra milimétricamente mediante la sincronización informática para entregar el plasmoide exactamente a la velocidad operativa de transferencia:

$$v_{out} = 2666 \text{ m/s}$$

Al culminar los **60 m** de recorrido a una velocidad de Mach 7.8 y precomprimido bajo un corsé magnético terminal de **7.2 T**, el plasma cruza la frontera de la Fase 1. Ingresa al codo de transición con la inercia exacta para superar la curva ciega sin rozar las paredes cerámicas protectoras.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos del Capítulo 5

El funcionamiento del Inyector Off-Axis interactúa de forma directa con tres vectores de fricción sistémica del reactor. El diseño maneja estos desafíos mediante las siguientes contramedidas secuenciales:

- **Desafío Técnico (Inestabilidad Rotacional - Clúster 1, Vector 3):** Durante la etapa de aceleración y compresión inicial, el anillo de plasma FRC tiende naturalmente a girar sobre su propio eje debido a la pérdida asimétrica de iones. Esta aceleración centrífuga desata la inestabilidad rotacional destructiva (modo **n=2**), deformando y centrifugando el plasmoide hasta estrellarlo contra las paredes cerámicas en fracciones de milisegundo.
- **Contramedida de Diseño:** La máquina descarta el uso de cañones físicos de plasma inyectado para frenar el giro, ya que arruinarían el ultra-alto vacío. En su lugar, el Cartucho 1 incorpora anillos macizos de **Tungsteno** conectados a fuentes de alta tensión. Estos electrodos aplican un voltaje de polarización electrostática continuo sobre las líneas de campo abiertas de la capa límite del plasma. El potencial eléctrico genera un efecto pasivo de cizalladura que bloquea el desgarramiento rotacional, estabilizando la geometría cilíndrica del haz a Mach 7.8 de forma remota.
- **Desafío Técnico (Colisiones por Intercambio de Carga - Clúster 3, Vector 1):** Inmediatamente después de disparar el haz, una estela de gas Deuterio-Tritio frío y neutro permanece rezagada en la recámara del Cartucho 1. Si el siguiente pulso cruza esta nube de gas sin evacuar, los iones rápidos del nuevo plasma colisionan con los átomos neutros y les roban sus electrones. Este fenómeno neutraliza eléctricamente el núcleo del plasmoide, provocando su escape instantáneo del corsé mag-

nético y apagando la reacción.

- **Contramedida de Diseño:** El sistema de control de vacío se fragmenta perimetralmente. Conectamos una matriz sobredimensionada de turbobombas MagLev al Cartucho 1. Para evitar que el campo estático de **0.5 T** del inyector induzca destructivas corrientes de Foucault en los rotores levitantes metálicos de las bombas, **estas nunca se atornillan directamente al chasis**. Se conectan mediante largas *Galerías de Derivación Dieléctricas* (tubos de vacío ortogonales de cerámica). Esta geometría aleja mecánicamente la mecatrónica hacia la trinchera paramagnética a **0 T**. El sumidero absorbe violentamente la estela neutra desde un refugio seguro, restaurando el ultra-alto vacío antes del siguiente disparo a **4 Hz**.
- **Desafío Técnico (Muro de Gigavatios y Ruptura Dieléctrica - Clúster 10, Vector 1):** Intentar inyectar y concentrar el 100% de la energía térmica de ignición directamente sobre el núcleo cerrado del reactor exige pulsos instantáneos superiores a los 16 GW. Esta brutal densidad de potencia desata arcos voltaicos masivos en los componentes dieléctricos, fundiendo las cañerías por corto-circuito y perforando las ventanas de vacío.
- **Contramedida de Diseño:** Desplazamos el precalentamiento fuera del núcleo principal. Al aprovechar la inmensa rampa de la Fase 1, el depósito térmico inicial de **25 MJ** se diluye sincronizándose con la ola de compresión peristáltica. Al distribuir esta energía a lo largo de los **33.75 ms** que dura la aceleración dinámica, el sistema opera bajo un régimen de potencia manejable de **~740 MW**. Esta cifra se encuentra cómodamente dentro de los márgenes de seguridad de los tiristores IGCT de catálogo comercial, blindando el hardware frente al estrés por arco dieléctrico.
- **Desafío Técnico (Inestabilidad de Volteo - Clúster 1, Vector 2):** Un anillo de plasma volando libremente a Mach 7.8 tiende de forma natural a voltearse sobre su eje transversal (modo **m=1**), destruyendo el confinamiento en menos de un microsegundo.
- **Contramedida de Diseño:** El Cartucho 1 incorpora Inyección de Haces Neutros (NBI) tangencial. Al disparar átomos neutros sobre el plasma estacionario durante sus primeros 15 milisegundos de vida, formamos una sub-población de iones rápidos. Estos iones actúan como un giroscopio interno incrustado en el FRC. Esta “coraza cinética” viaja con el proyectil e impide mecánicamente que el cilindro vuelque durante los 80 metros de vuelo balístico.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6 y Directrices Base

La arquitectura del inyector incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual rector:

- **[SV-8.6] (Estabilización por Polarización de Bordes):** Aplicada rígidamente en los electrodos de tungsteno del Cartucho 1 para el control electrostático de la inestabilidad rotacional sin inyección de materia.
- **[SV-3.7] (Bombeo de Contención contra Intercambio de Carga):** Integrada en las galerías de succión lateral del Cartucho 1 para abatir la presión barométrica local tras cada despegue del FRC.

- **[SV-8.2] (Calentamiento Termodinámico Distribuido):** Ejecutada al fraccionar la carga calórica total entre la rampa Off-Axis de la Fase 1 y el remate de la Fase 3, protegiendo las cerámicas.
- **[SV-3.2] (Bombeo Diferencial Intersticial):** Implementada en las juntas de unión que conectan los cuatro cartuchos modulares. Las bridas integran un sello doble metálico que mantiene una aspiración intermedia continua a 10^{-3} Torr, anulando el diferencial barométrico.
- **Cumplimiento del Axioma de Estabilidad (Capítulo 2.1):** La inyección de Haces Neutros (NBI) se restringe estricta y exclusivamente a los primeros 15 metros en reposo. Imprime el momento angular giroscópico antes del despegue, eludiendo el arrastre aerodinámico destructivo que ocurriría si se inyectara masa en pleno vuelo.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6 y Antipatrones

El diseño de la Fase 1 repudia de forma estricta los siguientes antipatrones de ingeniería, bloqueando sus mecanismos de fallo:

- **[SD-8.1] (Camisas Sacrificiales Neutrónicas en Zonas RMF):** Queda terminantemente prohibido instalar bloques masivos de blindaje metálico rodeando las antenas de radiofrecuencia. La protección se logra de forma puramente geométrica desplazando el inyector hacia una galería paralela (*Off-Axis*) con un ángulo de convergencia de 21.28° .
- **[SD-8.2] (Multiplexación Colectiva de Inyectores):** Se rechaza el uso de bifurcaciones en forma de "Y" para conectar un único inyector a múltiples tubos del reactor. Compartir volúmenes de vacío expondría a la recámara al colosal retroceso sónico del canal contiguo.
- **[SD-4.4] (Aleaciones de Titanio en Flujo de Hidrógeno):** Se prohíbe el uso de Titanio en el chasis o bombas del inyector. Actuaría como una esponja química, transmutando a Hidruro de Titanio (TiH_2) y adquiriendo una fragilidad absoluta. El soporte estructural se delega exclusivamente a la superaleación MP35N.
- **Cumplimiento de Aceleración Acoplada (Capítulo 3.2):** Queda terminantemente prohibido mecanizar el inyector con forma cónica o usar embudos magnéticos estáticos ciegos. Un gradiente magnético estático actúa como un espejo inductivo, induciendo una fuerza de frenado. La compresión a 7.2 T se ejecuta exclusivamente acompañando al proyectil mediante una ola peristáltica dinámica sobre un cilindro físicamente recto.

FASE 2 (Codo de Transición y Difusor Rectilíneo) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 2 opera como un desvío blindado y un expansor de alivio para el proyectil termonuclear. Su propósito es guiar el plasma proveniente del inyector a lo largo de una trayectoria curva perfectamente controlada. Este desvío introduce una ceguera óptica geométrica respecto al núcleo central. Actúa como un escudo que impide a los neutrones destructivos que retroceden desde la cámara de combustión impactar en línea recta contra las antenas de radiofrecuencia de la etapa anterior.

Inmediatamente después de completar la curva, el tubo se ensancha de forma gradual en un tramo rectilíneo. Esta sección funciona como un difusor aerodinámico que relaja de forma natural la densidad y la presión magnética del plasmoide. El proceso acondiciona mecánicamente el anillo de plasma antes de que acceda a la antecámara de ignición.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para asegurar la continuidad balística e hidráulica del túnel del reactor, este módulo se gobierna bajo las siguientes fronteras operativas:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC estructurado, cerrado y con cohesión magnética interna.
- **Velocidad de crucero:** Tránsito balístico estable a **2666 m/s**.
- **Temperatura inicial:** Régimen de precalentamiento fijado en **12 keV**.
- **Presión local:** Ultra-alto vacío preservado a **10^{-8} Torr**.
- **Campo magnético de entrada:** Compresión isomagnética acoplada a **7.2 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC de geometría ensanchada y centrado en el eje balístico principal.
- **Velocidad de entrega:** Velocidad lineal inalterada a **2666 m/s**.
- **Temperatura final:** Enfriamiento adiabático leve (caída fraccional por debajo de los **12 keV**). La expansión volumétrica consume una porción marginal de la entalpía térmica, un déficit que será compensado y remontado inmediatamente por el hardware de radiofrecuencia de la Fase 3.
- **Presión local:** Transición al Gradiente Barométrico Dinámico. La boca de salida asume la interfaz física con la zona caliente, degradando gradualmente el vacío desde los prístinos **10^{-8} Torr** de entrada hacia el entorno estabilizado de **10^{-6} Torr** que dominará el cañón principal.
- **Campo magnético terminal:** Corsé de contención estabilizado a **6.0 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

El conjunto del codo y el difusor adopta una configuración modular terrestre de calibres escalonados para gestionar las fuerzas de desvío inercial utilizando componentes comerciales de catálogo.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones de la Curva:** La Fase 2 despliega una eslora total combinada de **20 m**. Se asienta de forma rígida y nivelada sobre el plano horizontal de la planta (cota cero). La primera sección es un arco curvo de radio uniforme constante de **35 m** con una longitud de arco de **13 m** y un diámetro interior de **1.20 m**. Esta geometría proporciona un desplazamiento lateral exacto de **2.39 m** en el plano X-Y para conectar con la línea del inyector.
- **Dimensiones del Difusor:** La segunda sección es un tramo recto de **7 m** de longitud que actúa como difusor cono-divergente. Su diámetro interior ensancha uniformemente desde los **1.20 m** iniciales hasta alcanzar los **1.70 m** en la boca de salida.

Mecanismo de Extracción Robótica y Enclavamiento Axial:

- **Segmentación:** El sistema fragmenta la fase en dos cartuchos mecánicos independientes: el módulo del codo curvo y el módulo del difusor rectilíneo.
- **Desacople Cinemático:** Debido a que el codo experimenta una fuerza centrífuga continua mientras que el difusor recto experimenta una fuerza nula, la transición sufre un momento flector asimétrico. Para neutralizar esta tensión cíclica, la macro-estructura fragmenta su sujeción. La curva descansa sobre Soportes Cinemáticos de Deslizamiento Planar (X-Y). Este bloque actúa como un estator independiente que absorbe el esfuerzo transversal, aislando la junta elástica de vacío frente a la cizalladura estructural.
- **Protocolo de Sustitución:** Ante signos de fatiga, el SCADA aísla el sector mediante guillotinas pasivas UHV. Los tensionadores hidráulicos liberan las bridas perimetrales. Plataformas ferroviarias de perfil bajo sujetan el cartucho afectado y lo retiran deslizándolo horizontalmente sobre las guías de rodadura en **V** truncada del suelo. El módulo se extrae con un ángulo logístico de **45 grados** hacia la Celda Caliente, ejecutando el recambio de forma bidimensional sin detener los tubos colindantes.

Matriz de Componentes (BOM):

- **Blindaje Neutrónico de Impacto Recto (Estator Ciego):** Caja prismática con geometría en panal (Chevron) forjada en **Tungsteno** macizo, rellena con un lecho suelto de guijarros de **B₄C** y enfriada por **He** a **50 bar**. Para garantizar la ceguera óptica absoluta y evitar que la dilatación del tubo de vacío desalinee el escudo frente a los neutrones regresivos, esta coraza **se ancla rigidamente al estator fijo de los imanes**. El tubo de acero de la cámara de vacío caliente se desliza libremente por su interior de forma concéntrica, independizando el escudo térmico de la calderería en expansión.
- **Tubo de Vacío Estructural:** Cilindro de contención sin costuras fabricado en acero inoxidable austenítico **316LN de Grado Nuclear**. Está exento de fases ferromagnéticas y modificado local-

mente con brechas dieléctricas de **Alúmina** aplicadas mediante deposición en fase de vapor (CVD) a compresión en las caras de las bridas.

- **Corsé Magnético Criogénico:** Bobinas superconductoras de **NbTi** sumergidas en conductos rígidos CICC, refrigeradas por Helio líquido a un régimen estricto de **4 K**.
- **Devanados de Corrección Axial:** Bobinas resistivas de aleación de cobre **GlidCop**, dispuestas en una configuración de silla de montar helicoidal exterior sobre el cartucho de la curva.
- **Soportes de Rodadura:** Rodamientos pasivos macizos torneados en cerámica de **Si₃N₄** para permitir el desplazamiento libre por dilatación longitudinal sobre los carriles.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física de la Fase 2 se centra en la mitigación de las fuerzas de deriva centrífuga y en la expansión isentrópica controlada del anillo de plasma. Al forzar a un proyectil iónico de alta presión a describir un arco a **2666 m/s**, la inercia desata una fuerza transversal que tiende a estrellar la masa contra la pared cerámica exterior de la curva.

Para evitar que el FRC sufra un desgarró destructivo, las bobinas helicoidales superponen un campo cuadrupolar sobre el campo base. El equilibrio cinemático responde a la fuerza centrífuga:

$$F_c = \frac{m_p v^2}{R_c}$$

Donde F_c representa la fuerza centrífuga experimentada, m_p es la masa confinada del plasmoide, v es la velocidad de crucero y R_c es el radio de curvatura uniforme fijado en **35 m**. Esta inercia se contrarresta repeliendo la masa mediante la presión magnética del corsé externo sostenido rígidamente a **7.2 T**.

Inmediatamente después de superar la inflexión curva, el plasma accede al difusor recto de **7 m**. En este tramo, el tubo de acero diverge desde un diámetro interior de **1.20 m** hasta los **1.70 m** de la cámara principal. Sincronizadamente, las bobinas reducen intencionadamente la intensidad del campo de confinamiento desde los **7.2 T** iniciales hasta los **6.0 T** nominales.

Esta caída del campo obliga al plasma a expandirse radialmente, regido por el principio de conservación del flujo magnético interno del FRC (Φ_p):

$$\Phi_p \propto r_s^2 \cdot B_{ext} = \text{constante}$$

Igualando los estados en la entrada (Estado 1 a **7.2 T**) y en la salida (Estado 2 a **6.0 T**), podemos deducir cómo evoluciona el radio del plasmoide separador (r_s):

$$r_{s1}^2 \cdot B_1 = r_{s2}^2 \cdot B_2$$

Sabiendo que el objetivo en la salida (para la cámara de combustión) es un radio exacto de $r_{s2} = 0.493$ m, despejamos el radio que debe tener el plasma al ingresar al difusor (r_{s1}):

$$r_{s1} = r_{s2} \sqrt{\frac{B_2}{B_1}} = 0.493 \cdot \sqrt{\frac{6.0}{7.2}} \approx 0.493 \cdot 0.9128 \approx 0.450 \text{ m}$$

Verificación del Colchón de Vacío: Esta matemática confirma el encaje aerodinámico perfecto. Al entrar al difusor, la pared mide **1.20 m** de diámetro (radio de **0.60 m**) y el plasma mide **0.450 m** de radio; el vacío protector es de **15 cm**. Al finalizar el difusor, la pared mide **1.70 m** (radio de **0.85 m**) y el plasma se ha expandido a **0.493 m** de radio; el vacío protector crece asintóticamente hasta los **35.7 cm**. La dilatación isentrópica relaja la densidad iónica sin que la masa térmica llegue jamás a rozar la calderería, garantizando un acoplamiento limpio hacia la Fase 3.

Balance de Entalpía Adiabática: La termodinámica de esta transición exige un peaje físico. Al relajar la densidad iónica y permitir la expansión volumétrica del plasmóide sin inyectar potencia externa, el gas realiza un trabajo de expansión. Esto induce un leve enfriamiento adiabático natural, provocando que la temperatura iónica caiga fraccionalmente por debajo de los **12 keV** logrados en el inyector. Esta caída térmica controlada justifica la arquitectura modular de la planta: entrega un plasma mecánicamente estabilizado y relajado aerodinámicamente, dejándolo en las condiciones exactas de absorción para que los **3.2 GW** de la Fase 3 posterior apliquen el salto calórico definitivo hacia los **15 keV** de ignición.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El funcionamiento del Codo de Transición y Difusor interactúa directamente con los vectores de fricción industrial del reactor, mitigados mediante soluciones mecánicas y térmicas avaladas:

- **Desafío Técnico (Deriva Centrífuga y Separación de Cargas - Ref. Clúster 1, Vector 1):** Obligar a un plasma de alta energía a describir una trayectoria curva desata una deriva asimétrica ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) que proyectaría el combustible contra el chasis de acero en microsegundos, apagando la reacción.
- **Contramedida de Diseño:** La central incorpora la configuración de guiado cinemático [SV-8.7]. Superponemos un devanado cuadrupolar helicoidal resistivo sobre las bobinas de compresión a lo largo de los **13 m** del arco curvo. Retuerce las líneas de fuerza y permite al plasma girar con estabilidad óptica pura sin rozar la pared.
- **Desafío Técnico (Invasión Retrógrada Neutrónica - Ref. Clúster 14, Vector 1):** Los neutrones rápidos de **14.1 MeV** viajan en línea recta hacia atrás a través del túnel balístico e impactarían frontalmente contra el codo de transición, transmutando los metales estructurales.
- **Contramedida de Diseño:** Aplicamos una barrera estática integrando la solución [SV-7.1]. El vértice de impacto lineal se blindo con una caja de **Tungsteno** en geometría de panal (Chevron) refrigerada activamente. Su interior contiene un lecho de guijarros de **B₄C** que captura los neutrones sin activar el acero estructural subyacente.

- **Desafío Técnico (Corrientes de Foucault por Tránsito Supersónico y Quench - Ref. Doctrina 6.2):** Aunque el gradiente espacial de **7.2 T** a **6.0 T** es estático, el tránsito supersónico del campo magnético del propio FRC a **2666 m/s** genera un brutal gradiente temporal (dB/dt). Además, ante una parada de emergencia (*Quench*), la caída abrupta del campo matriz a cero induciría violentas corrientes parásitas azimutales en el acero, desatando un calor de Joule masivo que fundiría la calderería.
- **Contramedida de Diseño:** Utilizamos el principio de aislamiento dieléctrico profundo [SV-2.3]. Mecanizamos inserciones cerámicas de **Alúmina** aplicadas mediante CVD instaladas a compresión en las caras de acoplamiento de las bridas modulares del difusor, deteniendo en seco la propagación longitudinal de los remolinos eléctricos.
- **Desafío Técnico (Fatiga por Esfuerzos Transversales - Ref. Clúster 13, Vector 2):** El tránsito supersónico y la dilatación térmica generan un empuje inercial desequilibrado en la transición curva-recta que aflojaría el sellado UHV.
- **Contramedida de Diseño:** El diseño asimila el esfuerzo mediante el desacople geométrico de la solución [SV-1.5]. La curva se apoya sobre Soportes Cinemáticos de Deslizamiento Planar (X-Y). Esta configuración aísla el movimiento transversal de la brida, protegiendo el sello UHV sin anclajes destructivos.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura de la Fase 2 incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual de ingeniería:

- [SV-8.7] (**Guiado Cuadrupolar en Codos de Transición**): Aplicada en las bobinas helicoidales de la curva para cortocircuitar pasivamente la separación de cargas iónicas.
- [SV-7.1] (**Sistema de Defensa Pasiva en Chicane**): Integrada en el vértice del codo utilizando un escudo de **Tungsteno** y guijarros de **B₄C** con refrigeración activa por gas para asimilar los neutrones balísticos regresivos.
- [SV-2.3] (**Brechas CVD a Compresión y Estriado**): Ejecutada mediante anillos aislantes de **Alúmina** en las uniones de las bridas para estrangular el calor de Joule inducido por las corrientes de Foucault.
- [SV-1.5] (**Desacople Cinemático en "Z"**): Implementada mediante el uso de soportes de deslizamiento planar independientes bajo el módulo curvo. Absorbe los esfuerzos transversales y el momento flector inercial, desvinculando la junta de vacío UHV de las tensiones del cañón recto.
- [SV-3.2] (**Bombeo Diferencial Intersticial**): Uso de un anillo de sello doble metálico acoplado a un lazo de vacío medio a **10⁻³ Torr** para blindar las bridas modulares contra microfugas atmosféricas hacia el canal limpio.
- [SV-1.4] (**Raíles de Rodadura en V Truncada**): Carriles inferiores con canal central de fuga de polvo que permiten el libre desplazamiento de los cartuchos por dilatación térmica, utilizando ro-

damientos pasivos macizos de Si_3N_4 .

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño del Codo de Transición y Difusor repudia de forma estricta los siguientes antipatronos de ingeniería, bloqueando sus mecanismos de fallo:

- **[SD-8.6] (Superposición de Cuadrupolos de Vuelo Longitudinales):** Rechaza el uso de campos magnéticos cuadrupolares a lo largo de los trayectos rectos. Forzar devanados cuadrupolares en el difusor o en el cañón principal aplasta el anillo FRC deformando su sección transversal circular en elipses. Esta cizalladura destruye el confinamiento radial. Los cuadrupolos se restringen exclusivamente a la sección del arco curvo de **13 m** para anular la fuerza centrífuga puntual.
- **[SD-7.4] (Arquitectura de Impacto Directo y Superficies Planas):** Evita el uso de muros frontales o superficies de choque planas y perpendiculares a la trayectoria balística de los neutrones que retroceden desde el núcleo. Forzar un choque ortogonal desata un evento destructivo de rebote elástico supersónico. El blindaje neutrónico del vértice exterior se ejecuta en una geometría angulada en panal (Chevron) para disipar la energía y evitar la vaporización del material.
- **[SD-2.4] (Acero Austenítico Comercial 316L en Frontera Magnética):** Queda prohibido forjar los tubos del difusor o el codo en acero inoxidable 316L estándar. El estrés termomecánico de la curvatura y las soldaduras inducen la formación de fases ferromagnéticas locales (martensita). Al estar sometido a las pulsaciones magnéticas de la máquina, el acero comercial sufriría desgarro por torsión. Se exige rígidamente acero **316LN de Grado Nuclear** (cero ferrita) para garantizar el blindaje paramagnético absoluto.

FASE 3 (Antecámara de Ignición) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 3 actúa como el acelerador térmico final del reactor. Su propósito es suministrar el empuje energético definitivo para que el plasma cruce el umbral de fusión nuclear de forma controlada. Funciona de manera homóloga al postquemador de una turbina aeronáutica, pero operando de forma estrictamente electromagnética (ICRH). El módulo incrementa la entalpía del sistema mediante ráfagas secuenciales de ondas de radiofrecuencia puras, elevando la temperatura del plasma sin inyectar nueva masa. Durante este tránsito supersónico, el módulo preserva intacto el momento angular (rotación giroscópica) que el plasmoide ya adquirió en la Fase 1, garantizando su estabilidad balística antes de adentrarse en la inmaculada cámara de combustión.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para preservar la continuidad fluídica y cinemática a lo largo de los **185 metros** de longitud del reactor, este módulo opera bajo las siguientes fronteras de acoplamiento:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC de geometría ensanchada y centrado en el eje balístico principal.
- **Velocidad de crucero:** Tránsito balístico estable a **2666 m/s**.
- **Temperatura inicial:** Levemente inferior a **12 keV** (debido a la expansión adiabática del difusor de la Fase 2).
- **Presión local:** Ultra-alto vacío preservado a **10^{-8} Torr**.
- **Campo magnético de entrada:** Corsé de contención estático acoplado a **6.0 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC en estado de ignición termonuclear y estabilización giroscópica azimutal.
- **Velocidad de entrega:** Velocidad lineal inalterada a **2666 m/s**.
- **Temperatura final:** Umbral térmico de fusión alcanzado a **15 keV** base de ignición.
- **Presión local:** Transición al Gradiente Barométrico Dinámico (**10^{-6} Torr**). Al carecer de válvulas físicas frente a la cámara de combustión, la boca de salida asume la degradación inyectada por la desgasificación térmica del acero a 600 °C. Al igual que en las fases adyacentes, la velocidad a Mach 7.8 vuelve inofensivo este bache de presión momentáneo.
- **Campo magnético terminal:** Corsé magnético mantenido plano a **6.0 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

La antecámara adopta una configuración cilíndrica recta de gran calibre para albergar el array denso de inyectores de alta frecuencia, integrada mediante tecnologías comerciales (COTS).

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones Base:** El módulo se forja conformando un único macro-cartucho estructural de **10 m** de longitud total. Sostiene un diámetro interior constante de **1.70 m** para alinearse de forma milimétrica con la boca de salida del difusor anterior.
- **Orientación y Juntas de Expansión (Sistema Dual sin Contacto):** Se despliega rígidamente nivelado en cota cero. El extremo de salida incorpora el acoplamiento telescópico [SV-8.4]. Internamente, el labio en receso del estator frío penetra por el interior de la Fase 4 para absorber los **36 cm** de dilatación expansiva. **Crucialmente, este solape se diseña con una holgura anular con-**

céntrica ininterrumpida; los metales jamás se tocan. Al estar en ultra-alto vacío y sin contacto directo, la conducción térmica bimetalica es nula, impidiendo que los 600 °C del núcleo retrocedan y fracturen las cerámicas de Alúmina. Externamente, el vacío se sella con el fuelle de Inconel.

Mecanismo de Extracción Robótica y Blindaje Óptico:

- **Protocolo Logístico:** El macro-cartucho se asienta sobre bancos amortiguadores equipados con resortes Belleville. Esto otorga una flotabilidad elástica vertical de **3 mm** para eludir el hiperestatismo. Ante un ciclo de mantenimiento, las grúas ejercen una leve retracción horizontal, contrayendo el fuelle exterior y liberando el solape interno. El módulo se desliza de forma bidimensional sobre los raíles a **45 grados** hacia la Celda Caliente sin alterar el cañón principal.
- **Protección contra Radiación (Sombra Geométrica):** Al compartir el eje recto ininterrumpido con la cámara principal, esta fase sufre el riesgo de recibir neutrones de **14.1 MeV** retrocediendo en línea recta. Para proteger las delicadas ventanas de alúmina, se emplea una configuración de receso asimétrico. Las ventanas dieléctricas se instalan inclinadas hacia adelante (a favor del flujo de plasma), ocultas detrás de los gruesos escalones del almenado de Tungsteno de la primera pared. El metal detiene balísticamente los neutrones rectos, mientras que la abertura frontal permite la inyección impoluta de la onda RF hacia el plasma volador.

Matriz de Componentes (BOM):

- **Blindaje Mural (Primera Pared):** Tejas almenadas modulares forjadas en **Tungsteno** de alta densidad. Se fijan al chasis mediante soldadura fuerte activa (AMB) utilizando aleaciones de cobretitanio libres de plata.
- **Ventanas Dieléctricas en Receso:** Placas prismáticas de **Alúmina** de grado aeroespacial insertadas en sombra geométrica. Aíslan el vacío del reactor y permiten la penetración transparente de los campos de radiofrecuencia. Se unen mediante anillos intermedios de **Kovar**.
- **Envoltura Estructural y Corsé:** Cilindro macizo de acero **316LN de Grado Nuclear**. Envuelto por bobinas superconductoras CICC de **NbTi** enfriadas a **4 K** por Helio líquido.
- **Fuelle de Aislamiento UHV:** Lámina elástica perimetral corrugada de aleación Inconel, anclada a las bridas terminales para asimilar los esfuerzos mecánicos conservando el régimen de 10^{-8} Torr.
- **Líneas Coaxiales de Transmisión:** Barras conductoras de aleación de cobre **GlidCop** aisladas por vacío que transportan los gigavatios pulsantes desde los Generadores Marx.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física de la Fase 3 se rige por el acoplamiento de potencia en regímenes de microsegundos para elevar la temperatura iónica del FRC. El plasma ingresa al módulo arrastrando una leve merma térmica provocada por el trabajo de expansión volumétrica en la Fase 2. El sistema debe saldar esta deuda termodinámica y aplicar un remate térmico de **3 keV** para forzar el encendido nuclear antes de que el proyectil abandone los **10 m** de la antecámara.

El tiempo total de tránsito disponible para procesar el fluido a lo largo del módulo se calcula dividiendo la longitud del cartucho entre la velocidad balística de crucero:

$$\tau_{trans} = \frac{L_{cartucho}}{v_{crucero}} = \frac{10 \text{ m}}{2666 \text{ m/s}} \approx 0.00375 \text{ s (3.75 ms)}$$

Intentar inyectar el salto térmico concentrando toda la energía en un solo pulso estático exigiría potencias instantáneas que destruirían los aislantes por arco eléctrico. Para mitigar esta demanda transitoria, el sistema adopta una configuración de onda viajera de calentamiento secuencial. Las 20 antenas no se encienden de forma simultánea. Se activan de manera progresiva siguiendo al proyectil de plasma a medida que cruza el túnel.

El SCADA coordina el desfase temporal de encendido entre antenas consecutivas basándose en la distancia de separación física de los nodos y la velocidad del haz:

$$\Delta t_{antena} = \frac{d_m}{v_{crucero}} = \frac{0.50 \text{ m}}{2666 \text{ m/s}} \approx 1.875 \times 10^{-4} \text{ s (187.5 } \mu\text{s)}$$

“Este retardo milimétrico encadenado conforma la ventana de inyección efectiva de **1.87 ms** documentada para el núcleo. El disparo escalonado logra inyectar una potencia térmica total integrada de **3.2 GW** en el plasma, pero abate radicalmente la demanda instantánea. Al encenderse secuencialmente, la carga eléctrica simultánea sobre las barras colectoras se limita al esfuerzo unitario de **160 MW** del nodo activo. Esta dilución del pico electromagnético optimiza el almacenamiento en los condensadores y mitiga de raíz el estrés dieléctrico sobre las cerámicas, logrando elevar la temperatura hasta los **15 keV** definitivos de ignición sin desatar arcos voltaicos en el vacío.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El funcionamiento de la Antecámara de Ignición interactúa de forma directa con los vectores críticos de estrés dieléctrico y dilatación, mitigados mediante las siguientes contramedidas:

- **Desafío Técnico (Ruptura Dieléctrica por Ignición Súbita):** Inyectar decenas de gigavatios para el encendido en un espacio confinado desata arcos voltaicos masivos entre las antenas de cobre y el acero, fundiendo el vacío protector y destrozando las ventanas cerámicas.
- **Contramedida de Diseño:** Desplazamos el precalentamiento masivo aguas arriba (Fase 1) y aplicamos una inyección distribuida. Al fragmentar los **3.2 GW** requeridos en 20 inyectores bajo sincronización de onda viajera secuencial, diluimos el gradiente de potencia simultánea. Este escalonamiento mantiene los voltajes por debajo del umbral de avalancha (Curva de Paschen), blindando los dieléctricos comerciales.
- **Desafío Técnico (Pandeo por Dilatación Asimétrica):** La cámara de combustión adyacente (Fase 4) acumula un crecimiento térmico masivo. Si la antecámara se anclara de forma rígida frente a este

empuje inverso de **36 cm**, el acero sufriría pandeo termomecánico, desalineando el estricto eje de vuelo a Mach 7.8 y estrellando el plasma.

- **Contramedida de Diseño:** El labio de acero de la Fase 3 penetra concéntricamente por el interior de la Fase 4. Al estar orientada a favor del flujo supersónico, esta junta telescópica absorbe pasivamente el crecimiento longitudinal aguas arriba sin transmitir tensión a la antecámara. El diseño oculta el milimétrico escalón metálico a la abrasión sónica del plasma.
- **Desafío Técnico (Degradación Neutrónica de Dieléctricos en Línea de Tiro):** Al estar instaladas en un eje ininterrumpido con la cámara principal, los neutrones rápidos de **14.1 MeV** viajan hacia atrás impactando directamente en las cerámicas de las antenas, provocando hinchamiento y degradación eléctrica inducida por radiación (RIED).
- **Contramedida de Diseño:** Adoptamos una geometría de ceguera óptica parcial. Instalamos las ventanas de Alúmina en recesos fuertemente inclinados detrás de los gruesos escalones del revestimiento de Tungsteno. El metal escalonado detiene balísticamente los neutrones en línea recta, mientras que la abertura frontal permite la penetración limpia y transparente de la radiofrecuencia.
- **Desafío Técnico (Micro-Fricción y Soldadura en Frío):** Las vibraciones sónicas continuas a **4 Hz** generan micro-desplazamientos de la pesada calderería. En ultra-alto vacío, el contacto directo entre metales desata la soldadura en frío por fricción (*Galling*), atascando las guías logísticas.
- **Contramedida de Diseño:** Toda la Fase 3 se suspende sobre bancos de resortes Belleville. Otorga una flotabilidad vertical de **3 mm** que disipa la energía acústica y elude el hiperestatismo, facilitando un deslizamiento sin desgaste seco.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura del módulo incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual rector:

- **[SV-8.2] (Calentamiento Termodinámico Distribuido):** Ejecutada al fraccionar la carga calórica total entre la rampa Off-Axis de la Fase 1 y el remate final de la Fase 3, protegiendo las cerámicas del “Muro de Gigavatios”.
- **[SV-8.4] (Anclaje de Simetría Central Acoplado):** Uso de la junta telescópica en sombra aerodinámica para asimilar la expansión expansiva de **36 cm** originada en la Fase 4.
- **[SV-1.6] (Acoplamiento Cinemático Flotante):** Despliegue de los resortes Belleville en las bases para otorgar flotabilidad milimétrica y eludir la cizalladura estructural.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño de la Antecámara de Ignición rechaza de forma estricta los siguientes antipatronos de ingeniería, bloqueando el fracaso del hardware:

- **[SD-8.3] (Calentamiento Centralizado de Ignición Rápida / Muro de Gigavatios):** Descartamos el intento de comprimir la recámara de ignición a apenas **5 m** de longitud. Forzar el remate térmico en una distancia tan corta exige un pulso instantáneo superior a los 16 GW. Esa densidad de potencia fundiría cualquier guía de onda dieléctrica comercial. Obligamos estructuralmente a mantener la fase en **10 m** para distribuir un pulso dócil manejable de **3.2 GW**.
- **[SD-2.2] (Proyección Directa de Alúmina CVD sobre Cobre):** Dejamos atrás la práctica de proyectar recubrimientos cerámicos directamente sobre el cobre desnudo de las antenas para aislarlas del vacío. El calentamiento cíclico provoca la expansión del metal, astillando y escamando la cerámica inelástica. Inyectaría metralla en el canal de vuelo. Usamos ventanas macizas de Alúmina acopladas mediante juntas de transición elásticas de Kovar.
- **[SD-1.1] (Fricción Seca en Raíles de Acero):** Se prohíbe deslizar el chasis pesado de acero sobre raíles del mismo metal. El contacto directo generaría saltos mecánicos abruptos (*Stick-Slip*) que desalinearían la estricta puntería balística del chasis hacia el núcleo central. El sistema queda blindado aislando el apoyo mediante las plataformas flotantes y permitiendo una absorción termomecánica sin cizalladura seca.

FASE 4 (Cámara de Combustión) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 4 constituye el corazón térmico y el núcleo de producción energética del reactor. Su misión es confinar de forma estrictamente rectilínea el proyectil de plasma en estado de ignición a lo largo de su trayectoria. Debemos imaginar este módulo como un inmenso cañón lineal envuelto por un manto activo de sal líquida **FLiBe** y un corsé criogénico. El plasma atraviesa esta galería flotando sobre un raíl magnético inmutable sin llegar a tocar jamás las paredes cerámicas. Durante los **30 milisegundos** de vuelo balístico, la reacción libera un torrente continuo de neutrones rápidos de alta energía.

La estabilidad geométrica del proyectil frente a desviaciones rápidas se delega en una matriz estática de losetas de Tungsteno-Renio (**W-Re**) incrustadas en el fondo de los canales de acero del chasis. Cuando el plasma sufre una oscilación milimétrica, induce Corrientes de Foucault locales dentro de estos bloques independientes. Debido a la distancia de seguridad, los campos magnéticos repulsivos de cada loseta se expanden y se superponen en el espacio vacío; el plasma experimenta una coraza electromagnética continua y homogénea que lo corrige y lo devuelve al eje de tiro de forma puramente pasiva.

Para absorber de inmediato el calor generado por esta resistencia óhmica y el impacto de la radiación, el colosal torrente de sal **FLiBe** fluye a alta velocidad bañando directamente la cara superior expuesta y enrasada de las losetas. Este flujo estrictamente laminar extrae la carga térmica unitaria para verterla al colector principal, conformando junto al resto de la matriz operativa los **800 MWth** de potencia agregada

hacia las turbinas comerciales. Al mismo tiempo, utiliza el impacto neutrónico para criar el nuevo combustible Tritio en el interior del manto, blindando la calderería y autoabasteciendo a la central de forma ininterrumpida.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para garantizar la estabilidad macroscópica y el equilibrio hidrodinámico del reactor, este gran cilindro opera bajo las siguientes fronteras de acoplamiento:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC en estado de ignición termonuclear y estabilización giroscópica azimutal.
- **Velocidad de crucero:** Tránsito balístico supersónico a **2666 m/s** (Mach 7.8).
- **Temperatura inicial:** Núcleo ardiendo estabilizado en un régimen base de **15 keV**.
- **Presión local (Entrada):** Transición al Gradiente Barométrico Dinámico; el entorno asume un vacío medio operativo de **10^{-6} Torr** debido a la desgasificación térmica del metal.
- **Campo magnético de entrada:** Corsé de contención axial plano acoplado a **6.0 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC al término de su combustión nuclear, manteniendo su estructura cilíndrica.
- **Velocidad de entrega:** Velocidad lineal inalterada a **2666 m/s**.
- **Temperatura final:** Régimen térmico remanente mantenido a **15 keV**.
- **Presión local (Salida):** Vacío medio operativo estabilizado a **10^{-6} Torr**. La velocidad balística a Mach 7.8 vuelve inofensivo este régimen frente al intercambio de carga.
- **Campo magnético terminal:** Transferencia isomagnética hacia la tobera a **6.0 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

El cañón de combustión adopta una arquitectura segmentada de gran escala diseñada para diluir el castigo neutrónico y permitir un mantenimiento automatizado rápido utilizando componentes comerciales de catálogo.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones Globales:** El cañón despliega una longitud recta ininterrumpida de **80 m**. Su diámetro interior útil se establece en **1.70 m** para conceder un colchón de vacío protector de **35.7**

cm alrededor del plasma. El diámetro exterior consolida un volumen de **4.80 m**, permitiendo que cada segmento se adapte a los gálibos del transporte ferroviario comercial.

- **Segmentación Logística:** La galería de **80 m** se fragmenta mecánicamente en cinco cartuchos modulares idénticos de **15 m** de longitud útil. Para completar la eslora inalterable y permitir la accesibilidad, el diseño intercala 4 espacios inter-cartucho de exactamente **1.25 m** de separación axial. Sin embargo, para cumplir la expansión acumulativa de la central, el chasis de vacío de los 5 módulos se emabrida rígidamente en el eje longitudinal, transmitiendo el empuje térmico íntegro hacia los extremos. Los intersticios de **1.25 m** se utilizan de forma exclusiva para separar los clústeres del corsé magnético criogénico y para albergar las liras elásticas de dilatación (U-Bends) de las tuberías de sal **FLiBe**, aislando la dinámica de los fluidos primarios del crecimiento del acero estructural.

Mecanismo de Extracción Robótica y Control de Dilatación:

- **Alineación Cinemática:** Operando a una isoterma continua de **600 °C**, el acero de la cámara experimenta una elongación térmica masiva que acumula **72 cm** de crecimiento lineal. Para evitar el pandeo termomecánico que desviaría el eje óptico balístico, la central aplica la solución de anclaje de simetría central [SV-8.4]. El ecuador exacto del cañón se fija rígidamente al suelo de hormigón (Coordenada Cero). Esta decisión divide la dilatación obligando al acero a crecer **36 cm** hacia babor y **36 cm** hacia estribor de forma simétrica.
- **Rodadura y Desacople:** El peso de los cartuchos descansa sobre rodamientos pasivos macizos de **Si₃N₄** que deslizan sobre raíles inferiores en **V** truncada [SV-1.4]. Al dilatarse, el cañón rueda libremente manteniendo el eje coaxial de forma gravitatoria. Ante una avería, el SCADA activa los sellos de cambio de fase [SV-5.4] para congelar la sal primaria. Los tensionadores hidráulicos liberan las bridas y las plataformas ferroviarias terrestres extraen exclusivamente el cartucho de **15 m** afectado a un ángulo de **45 grados** hacia la Celda Caliente sin detener las unidades contiguas.

Matriz Estratigráfica de Componentes (BOM) [Actualizada y Auditada]:

- **Capa 1 (Primera Pared de Exposición Directa):** Tejas cerámicas almenadas forjadas en **Tungsteno** de alta densidad, desprovistas de cualquier recubrimiento químico de captura (NEG) para eludir la desgasificación térmica a **600 °C**. Actúan como barrera refractaria pura frente al impacto neutrónico. La evacuación de los gases en este sector se delega íntegramente a la cinemática del Transporte Balístico de Masa ([SV-3.4]). Se fijan al chasis mediante soldadura fuerte activa (AMB) de cobre-titanio libre de plata.
- **Capa 2 (Encamisado Estructural de Vacío y Transparencia Magnética):** Cilindro de contención estanco forjado sin costuras en **Acero ODS (Eurofer-97 Dopado)**. Forja en su cara exterior la red de canales longitudinales lisos destinados a laminar la sal. Cuenta con un tratamiento exterior de aluminización profunda (*Pack-Cementation*) para blindar el metal contra la corrosión del fluoruro, bloquear la permeación inversa de Tritio hacia el vacío y resistir el daño atómico DPA.
- **Capa 3 (Estabilización Magnetohidrodinámica Intracore):** Losetas macizas de **Tungsteno-Renio (W-Re)** de **50 cm** de longitud. Se incrustan en el fondo de los canales de acero dejando

huecos vacíos de **5 mm** entre ellas para eludir la cizalladura térmica. Se fusionan atómicamente al chasis mediante Prensado Isostático en Caliente (HIP) con Material de Gradiente Funcional (FGM). Su cara superior queda descubierta y a ras del canal bañada por el FLiBe para su enfriamiento efectivo. Actúan como circuitos locales independientes de Corrientes de Foucault, generando un escudo repulsivo unificado sin requerir continuidad física.

- **Capa 4 (Manto de Absorción y Cría):** Canal envolvente de **80 cm** de espesor por el que circula un río de sal iónica fundida **FLiBe** enriquecida al 90% con Litio-6. El fluido se inyecta desde plenums anulares ocultos a un ángulo estricto de **8°**. La sal transita de forma puramente laminar por los canales de acero, bañando directamente la cara plana expuesta de las losetas de W-Re para garantizar una refrigeración extrema por contacto directo.
- **Capa 5 (Escudo de Intercepción de Foucault):** Camisa cilíndrica maciza de **Bronce-Aluminio** que envuelve el manto a una isoterma de **600 °C**, diseñada para absorber de forma pasiva el rizado electromagnético a **4 Hz** originado por la diafonía de la matriz Gatling.
- **Capa 6 (Aislamiento Criogénico Todo-Metal):** Tabique estanco de Inconel 718 corrugado que encierra pantallas reflectoras multicapa (AMMLI) basadas en láminas pulidas espejo de Aluminio-Litio separadas por polvo cerámico de **Si₃N₄**.
- **Capa 7 (Corsé Magnético Primario):** Bobinas superconductoras operando a **6.0 T** constantes, integradas por cables en conducto (CICC) de filamentos de **NbTi** provistos de una barrera resistiva individual de Cuproníquel (**CuNi**), bañados en Helio líquido a **4 K**.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La ingeniería de la Fase 4 exige resolver de forma simultánea la dilución del daño por radiación neutrónica y el balance de masa fluidica para evacuar el calor bruto sin desatar pérdidas de carga por fricción magnética. Cada disparo del reactor inyecta una cosecha térmica de **200 MJ**. El algoritmo de disparo Gatling prorratea esta energía a lo largo del ciclo respiratorio de **7.5 segundos**, convirtiendo los latidos nucleares en una entrega calórica media y constante de **26.66 MWth** por tubo.

Dado que el 80% de la energía de la reacción D-T se libera en forma de neutrones rápidos de **14.1 MeV**, la potencia neutrónica pura (P_n) que golpea la primera pared de cada tubo se calcula de la siguiente manera:

$$P_n = 0.80 \cdot P_{th_tubo} = 0.80 \cdot (26.66 \times 10^6 \text{ W}) \approx 21.33 \times 10^6 \text{ W} = 21.33 \text{ MW}$$

Para evitar que este flujo energético triture las redes cristalinas del acero, la arquitectura RIF estira la cámara de combustión. Al esparcir la termia linealmente a lo largo de **80 m** con un diámetro de **1.70 m**, la superficie interior total de exposición de la cámara (A_{wall}) se dimensiona geoméricamente:

$$A_{wall} = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot 1.70 \text{ m} \cdot 80 \text{ m} \approx 427.26 \text{ m}^2$$

La densidad de carga neutrónica superficial media (L_n) que debe soportar el encamisado Eurofer se deduce dividiendo la potencia atómica entre el área mural disponible:

$$L_n = \frac{P_n}{A_{wall}} = \frac{21.33 \times 10^6 \text{ W}}{427.26 \text{ m}^2} \approx 49,922 \text{ W/m}^2 \approx 49.92 \text{ kW/m}^2$$

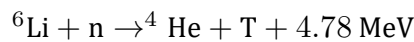
Un nivel de exposición de apenas **49.92 kW/m²** constituye una magnitud extraordinariamente baja para la ciencia de materiales nucleares actual. Al untar el castigo atómico sobre una superficie inmensa, el daño por desplazamiento (DPA) acumulado cae por debajo de los límites críticos. Esto permite utilizar aceros estructurales de catálogo industrial y estandariza los ciclos de recambio logístico como tareas rutinarias programadas.

Para cosechar de forma eficiente estos megavatios de calor útiles, las turbobombas MagLev impulsan una colada continua de sal fundida **FLiBe** a través del encamisado exterior de la cámara. Sosteniendo un calor específico (C_p) de **2380 J/(kg·K)** y limitando el salto térmico de la calderería (ΔT) a un rango elástico de **100 °C** (entrada a **500 °C** y salida hacia el colector a **600 °C**), el caudal másico de sal requerido por cada tubo ($\dot{m}_{tube}$) responde al balance hidrodinámico:

$$\dot{m}_{tube} = \frac{Q_{tube}}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{26.66 \times 10^6 \text{ W}}{2380 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 100 \text{ K}} \approx 112.04 \text{ kg/s}$$

Multiplicando este valor por la matriz operativa nominal de carga base (30 tubos bombeando sal líquida simultáneamente hacia el colector conjunto), el bucle primario consolida un río de fluido total de **3361.34 kg/s** circulando de forma estable hacia los intercambiadores civiles.

Paralelamente, la captura neutrónica dentro de la sal líquida gatilla la cría endógena de Tritio. Al interactuar los neutrones moderados con el Litio-6 enriquecido, la reacción nuclear inyecta entalpía adicional por primeros principios:



Esta reacción produce el autoabastecimiento isotópico de la planta aportando **4.78 MeV** de ganancia calórica pura por cada núcleo transmutado. Las cenizas de Helio-4 resultantes de la combustión en el canal de vacío son empujadas de forma continua por el arrastre viscoso transitorio provocado por la altísima velocidad supersónica (Mach 7.8) del propio FRC, barriendo el gas inerte hacia las zonas de succión terminal.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

El funcionamiento de la Cámara de Combustión interactúa de forma directa con múltiples vectores de fricción destructiva acoplada (termodinámica, radiológica y electromagnética). Ninguna pieza del ensamblaje opera de forma aislada. La arquitectura neutraliza estos riesgos mediante las siguientes contramedidas cruzadas:

5.1. Resolución de Riesgos del Capítulo 5

- **Desafío Técnico (Muro Hidrodinámico por Freno MHD - Clúster 4, Vector 1):** Impulsar un caudal masivo de sal iónica líquida (**FLiBe**) hacia el interior de la cámara exige cruzar las líneas de fuerza del campo magnético de **6.0 T**. Esta interacción desata una fuerza de Hartmann colosal que actúa como un freno hidrodinámico en seco, bloqueando el movimiento del fluido, elevando la presión por encima de los **40 bar** y reventando las juntas de la calderería pesada.
- **Contramedida de Diseño:** La central altera la geometría de inyección aplicando las soluciones combinadas [SV-5.1] y [SV-5.2]. Las derivaciones hidráulicas no perforan el corsé magnético de forma ortogonal. El **FLiBe** se inyecta desde plenums anulares ocultos en el espesor del acero de cada cartucho, con un ángulo rasante asintótico de $\leq 8^\circ$ respecto al eje longitudinal, mitigando el vector de resistencia de Hartmann en un **86%**. Una vez dentro, la sal corre encauzada de forma laminar por canales lisos esculpidos en el acero Eurofer. El fluido viaja pegado a las líneas de fuerza magnética sin cruzarlas jamás, eliminando el bloqueo MHD y manteniendo la presión estabilizada en la banda elástica segura de **5 bar**.
- **Desafío Técnico (Pandeo Termomecánico y Desalineación - Clúster 13, Vector 1):** El calentamiento sostenido del cilindro de acero a **600 °C** provoca una dilatación longitudinal masiva que estira el reactor **72 cm**. Si la calderería se anclara rígidamente al suelo de la nave, la fuerza de expansión deformaría y combaría el tubo central. Arquear la galería apenas unos milímetros desalinearía el eje óptico balístico, provocando que el proyectil de plasma a **2666 m/s** chocara de frente contra las cerámicas, derritiendo el hardware nuclear.
- **Contramedida de Diseño:** Implementamos las doctrinas cinemáticas [SV-8.4] y [SV-1.4]. El centro exacto del cañón se fija rígidamente a la losa sísmica mediante un pasador de cizalladura profunda (Coordenada Cero), dividiendo el crecimiento en dos vectores opuestos e iguales de **36 cm**. El peso del chasis descansa sobre rodillos macizos de cerámica **Si₃N₄** montados en carriles en **V** truncada. Al calentarse, el acero expande deslizando suavemente. La gravedad obliga al cañón a descansar perennemente en el vértice profundo de la guía, manteniendo el eje de tiro matemáticamente inalterado.
- **Desafío Técnico (Rizado Magnético, Diafonía Cruzada y Cortocircuito Criogénico - Clúster 6, Vector 1):** El tubo opera inmerso en una matriz Gatling donde las unidades vecinas disparan de forma secuencial, inundando la nave logística con un constante fuego cruzado electromagnético a **4 Hz** (diafonía magnética). Esta fluctuación induce violentos remolinos eléctricos (corrientes de Foucault) en el acero del reactor, desatando un calor de Joule masivo. Si este calor viaja por conducción hacia el criostato exterior, evaporaría las reservas de Helio líquido, desatando un colapso magnético masivo (*Quench*) que destruiría los imanes a **4 K**.
- **Contramedida de Diseño:** La central interpone una barrera de amortiguación protectora [SV-2.1]. Envolvemos el manto de sal individual de cada tubo con camisas cilíndricas macizas de **Bronce-Aluminio** que operan a **600 °C**. Estas estructuras actúan como escudos calientes de sacrificio: capturan y cortocircuitan los remolinos eléctricos cruzados, disipando la energía térmica útil hacia el

lazo primario. Complementariamente, cada hebra superconductora incorpora una barrera resistiva individual de Cuproníquel (CuNi) en topología CICC, estrangulando las corrientes residuales y salvaguardando la criogenia.

- **Desafío Técnico (Inestabilidad Crítica de Volteo FRC - Clúster 1, Vector 2):** Durante el recorrido balístico de **80 m**, la desintegración del plasma tiende a desestabilizar la separatriz. El anillo FRC experimenta una inestabilidad macroscópica de volteo (modo **m=1**), perdiendo su confinamiento y colapsando contra la pared en apenas **0.3 microsegundos**. Utilizar varillas cilíndricas continuas para repelerlo genera vórtices en la sal refrigerante y cizalladura térmica en el chasis.
- **Contramedida de Diseño (Estabilización Discreta por Foucault):** Aplicamos la estabilización intracore de estado sólido [SV-5.1]. En el fondo de los canales lisos de acero se incrustan losetas planas de Tungsteno-Renio de **50 cm**. Al estar enrasadas, el FLiBe fluye laminarmente sobre ellas sin generar turbulencia, extrayendo el calor directamente. Se separan por brechas vacías de **5 mm** para eludir la cizalladura bimetálica, fusionadas al chasis mediante FGM. Físicamente, las Corrientes de Foucault requeridas para repeler la inestabilidad forman bucles cerrados independientes dentro de cada loseta. Como el plasma vuela a un radio de distancia de **35 cm**, las fuerzas magnéticas locales de cada loseta se superponen en el espacio vacío. El proyectil experimenta un campo magnético de repulsión unificado y perfecto. Cero piezas móviles, cero arcos eléctricos y cero turbulencia hidráulica.
- **Desafío Técnico (Pico Térmico Inverso por Apagón y Drenaje - Clúster 9, Vector 2):** Ante una pérdida total de potencia, la sal se evacúa hacia la trinchera por la pendiente pasiva de **3°**. Vaciar el manto líquido elimina la refrigeración principal, pero la desintegración gamma residual sigue activa en el acero Eurofer. Sin un escape de calor, el metal sufriría un pico térmico inverso destructivo.
- **Contramedida de Diseño:** La nave logística activa los tiros de compuertas neumáticas del sistema [SV-1.4] (Inclinación Estructural y Convección RVACS). La central aprovecha la parada de los imanes y la inclinación fundacional para inducir una corriente de aire atmosférico ascendente por convección natural a través de las camisas externas vacías del criostato, disipando el calor de desintegración en seco de forma completamente pasiva.
- **Desafío Técnico (Invasión de Tritio por Permeación - Clúster 2, Vector 3):** El diferencial de presión entre la sal FLiBe (a **5 bar**) y el interior del reactor (**10^{-8} Torr**) fuerza al Tritio recién criado a migrar a través de la pared de acero a **600 °C**, saturando la película química de ultra-alto vacío desde atrás.
- **Contramedida de Diseño:** Se aplica el tratamiento exterior de aluminización profunda (*Pack-Cementation*) al encamisado de Eurofer. Esta fase intermetálica inquebrantable de alúmina actúa como barrera estructural absoluta. Confina el Tritio en el canal de fluidos y protege las paredes interiores contra la permeación inversa.
- **Desafío Técnico (Fractura de Refractario por Transición Dúctil-Frágil):** Al arrancar la central en frío, el impacto sónico de la ignición estrellaría su onda de choque contra las tejas de Tungsteno. A temperatura ambiente, este metal se encuentra por debajo de su Temperatura de Transición Dúctil

a Frágil (DBTT) y resulta quebradizo. El latido unitario a **7.5 segundos** haría estallar la primera pared.

- **Contramedida de Diseño:** Implementamos la doctrina [SV-4.1]. El sistema SCADA establece un interbloqueo físico que prohíbe el disparo hasta que el lazo de calentamiento magnético perimetral (SEH) eleva la temperatura del Tungsteno por encima de los **500 °C**. Al obligar a la cerámica a operar en su fase dúctil, el material absorbe la deformación acústica sin fracturarse.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura del módulo principal incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual rector:

- **[SV-8.4] (Anclaje de Simetría Central Acoplado):** Fijación en la Coordenada Cero para obligar al acero a dilatar **36 cm** en ambas direcciones de forma predecible.
- **[SV-1.4] (Rodadura Pasiva en “V” Truncada):** Apoyo sobre cerámica maciza que centra pasivamente el tubo balístico mediante gravedad frente a los **72 cm** totales de expansión elástica.
- **[SV-5.1] (Arquitectura Intracore Unificada):** Uso de losetas fragmentadas de W-Re incrustadas en el canal para inducir corrientes de Foucault independientes sin riesgo de cizalladura bimetálica.
- **[SV-5.2] (Entrada y Salida por Ángulo Rasante Asintótico):** Inyección del inmenso caudal de FLiBe a $\leq 8^\circ$ para esquivar el Freno MHD de la Fuerza de Hartmann.
- **[SV-5.4] (Aislamiento por Fusión Direccional - Freeze Seals):** Clausura térmica sin válvulas mecánicas para aislar los cartuchos averiados usando tapones de sal congelada.
- **[SV-2.1] (Amortiguación Bimetálica y Matriz CICC CuNi):** Implementación de la camisa maciza de Bronce-Aluminio a **600 °C** para absorber la diafonía magnética a **4 Hz** de la matriz circundante.
- **[SV-4.1] (Interbloqueo Termomecánico SCADA):** Exigencia estricta de precalentamiento del tungsteno por encima de **500 °C** para asegurar su régimen dúctil frente al impacto de ignición.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño de la Cámara de Combustión repudia de forma estricta los siguientes antipatronos de ingeniería, bloqueando el colapso del núcleo:

- **[SD-5.2] (Microcanales de Enfriamiento en Zona de Alto Daño DPA):** Evitamos esculpir microredes de enfriamiento PCHE directamente en la primera pared. El daño atómico de **14.1 MeV** inflaría los tabiques (*Swelling*), estrangulando el caudal de FLiBe y fundiendo el metal. La laminación fluye en canales macroscópicos.
- **[SD-5.1] (Inserciones Intracore Rígidas de SiC):** Rechazamos aislar galvánicamente el FLiBe de los canales usando tubos de cerámica rígida. La dilatación diferencial del acero frente a la inercia del SiC reventaría los aislantes provocando fugas presurizadas instantáneas.

- **[SD-4.3] (Cobre Desnudo en Primera Pared):** Se prohíbe soldar masivos bloques estabilizadores de cobre desnudo dentro del vacío primario. Bajo la alta tasa de DPA, el cobre transmuta, acumula gases, se delamina y paraliza la central. La primera línea se delega estrictamente a la aleación pesada refractaria de Tungsteno-Renio.
- **[SD-1.2] (Flotación Fluídica del Chasis):** Descartamos asentar la tonelada de acero dilatado sobre lechos o piscinas de metal líquido para “lubricar” la dilatación. La asimetría de extracción calórica provocaría un gradiente de temperatura vertical, induciendo un pandeo térmico (*Thermal Bowing*) que curvaría el túnel y estrellaría el FRC a **2666 m/s**.
- **[SD-5.8] (Impulsión Electromagnética Lineal DC-EMP):** Queda terminantemente prohibido utilizar bombas sin partes móviles inyectando alto voltaje para empujar la sal en el circuito de la cámara. Al ser el FLiBe un fluido iónico, se desataría una electrólisis letal, inyectando gas de Flúor corrosivo y solidificando Litio. La impulsión asume el flujo externo por turbobombas MagLev.

FASE 5 (Tobera Convertidora DEC) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 5 opera como el amortiguador magnético y el dinamo auxiliar de la central. Su propósito fundamental es frenar el flujo de partículas cargadas mediante inducción mutua para proteger los componentes sólidos de las etapas posteriores, transformando la inercia termonuclear en electricidad pura. Debemos imaginar este módulo como un embudo divergente de calderería dieléctrica envuelto por una jaula activa de bobinas inductoras.

Al cruzar la tobera a velocidad supersónica, el campo magnético del plasma empuja contra los anillos exteriores de cobre. Por pura Ley de Lenz, la jaula opone resistencia, el haz reduce su inercia y genera un colosal pulso eléctrico transitorio. Esta energía complementaria constituye una fracción útil que la planta cosecha internamente para cofinanciar el suministro de sus propios sistemas criogénicos y de vacío, aliviando de forma directa la carga parasitaria sobre el bloque de potencia principal de la central.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para garantizar la continuidad balística y el aislamiento elástico de los lazos de potencia, este embudo se gobierna bajo las siguientes interfaces paramétricas:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Plasma FRC al término de su combustión nuclear, reteniendo su carga de partículas ionizadas.
- **Velocidad de crucero:** Tránsito balístico supersónico a **2666 m/s** (Mach 7.8).

- **Temperatura inicial:** Núcleo expandido con entalpía térmica remanente a **15 keV**.
- **Presión local (Entrada):** Régimen de vacío medio operativo heredado a **10^{-6} Torr**. Al empalmar directamente con el cañón caliente, la embocadura asume la lectura barométrica más alta del gradiente dinámico.
- **Campo magnético de entrada:** Corsé de contención axial acoplado a **6.0 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Flujo iónico residual expandido, desacelerado y encauzado hacia la chicane de desviación.
- **Velocidad de entrega:** Velocidad lineal reducida por el freno inductivo a **1686 m/s**.
- **Temperatura final:** Enfriamiento adiabático masivo (caída drástica por debajo de los **15 keV**). Al expandirse volumétricamente contra el corsé magnético y realizar trabajo electromotriz, el plasma agota su entalpía térmica interna, la cual es cosechada en forma de electricidad de corriente continua.
- **Presión entregada (Salida):** Recuperación asintótica del gradiente. Al acercarnos a los sumideros criogénicos terminales, la divergencia aerodinámica facilita la succión y la presión decae hacia un vacío profundo transicional en el rango de los **10^{-7} Torr**.
- **Campo magnético terminal:** Umbral forzado de salida a **0.75 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

La tobera adopta una macro-geometría cónica de calibre divergente. Está diseñada para permitir la expansión radial del plasma sin contacto físico mural y se integra enteramente mediante tecnología de catálogo.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones Base:** El módulo despliega una longitud física total de **15.50 m**. Se instala rígidamente nivelado en cota cero sobre el plano horizontal X-Y de la central. Para armonizar el deslizamiento térmico del cañón central con la extracción electromagnética, se divide en dos sub-tramos estrictos:
- **Collarín Cilíndrico Ciego:** Los primeros **0.50 m** de longitud mantienen un diámetro constante de **1.70 m**. Actúa como guía receptora termomecánica estática.
- **Embudo Divergente de Extracción:** Los siguientes **15.00 m** de longitud se abren aerodinámicamente desde los **1.70 m** hasta los **3.00 m** de diámetro interior exacto.
- **Perfil de Divergencia:** La expansión radial libre de **0.65 m** por flanco se distribuye exclusivamente a lo largo del embudo de **15.00 m**. Esto fija un ángulo de divergencia constante de **2.48°** respecto al eje de tiro.

- **Junta Telescópica y Sistema Dual [SV-1.8]:** El collarín cilíndrico inicial envuelve concéntricamente el labio de salida de la cámara de combustión (Fase 4). Configura un acoplamiento aerodinámico en sombra que absorbe los **36 cm** de dilatación térmica del acero sin interponer fricción frontal, deslizándose con tolerancia radial nanométrica. Externamente, el sello absoluto del ultra-alto vacío se delega a un inmenso fuelle elástico perimetral de Inconel anclado mediante bridas de apriete hidráulico.

Mecanismo de Extracción Robótica y Corsé de Pre-Tensado:

- **Segmentación:** La jaula de inducción se fragmenta mecánicamente en anillos transversales independientes desacoplados galvánicamente entre sí. Cada anillo de cobre se encaja flotando milimétricamente sobre manguitos cerámicos. Para neutralizar el aplastamiento provocado por las fuerzas de Lorentz a la frecuencia de **4 Hz**, la cerámica se ensambla bajo un corsé rígido pre-tensado a compresión axial mediante tirantes exteriores de Inconel.
- **Colchón de Vacío Seguro:** El SCADA calibra el radio del haz para fijar un límite de radio fraccional estricto de $x_s = 0.933$. Esto confina el plasma a un radio máximo de **1.40 m** dentro de la boca de salida de **1.50 m** de radio físico. Garantiza un colchón de vacío protector de **10 cm** que elude cualquier contacto térmico destructivo con las cerámicas.
- **Sustitución Logística:** Ante un aviso de mantenimiento estructural, los tensionadores hidráulicos liberan las bridas perimetrales del fuelle UHV y se purga el circuito de refrigeración gaseosa. Una plataforma ferroviaria automatizada sujeta el macro-cartucho de **15.50 m** y lo retira deslizándolo horizontalmente sobre los raíles con un ángulo de evacuación diagonal de **45 grados** en dirección a la Celda Caliente. Permite reemplazar la tobera en horas sin detener los tubos paralelos operativos.

Matriz Estratigráfica de Componentes (BOM) [Auditada]:

- **Capa 1 (Primera Pared Dieléctrica y de Vacío):** Manguitos cerámicos masivos forjados en **Nitruro de Silicio (Si_3N_4)**. Actúan como barrera primaria de ultra-alto vacío. Al ser un material dieléctrico (no conductor), resultan electromagnéticamente transparentes. Permiten que el campo magnético variable del plasma cruce la pared sin generar calor de Joule parasitario ni fundir la frontera física.
- **Capa 2 (Jaula de Inducción Activa):** Múltiples anillos independientes forjados en aleación de cobre disperso en alúmina (**GlidCop AL-15**). Reciben el impacto electromotriz (Ley de Lenz) que ha atravesado la cerámica y lo transforman instantáneamente en electricidad pura.
- **Capa 3 (Refrigeración Intrínseca):** Flujo de **Helio Supercrítico (scHe)** a **200 bar** circulando por los microcanales internos del GlidCop y rellenando el intersticio flotante con la cerámica. Actúa simultáneamente como refrigerante termodinámico y como amortiguador mecánico frente a la dilatación del cobre.
- **Capa 4 (Corsé Estructural de Pre-Tensado):** Tirantes exteriores macizos de **Inconel 718** que abrazan y pre-comprimen los manguitos cerámicos. Mantienen la estructura bajo compresión con-

stante, evitando que el Si_3N_4 se fracture por tracción ante las violentas fuerzas de expansión magnética transitoria.

- **Capa 5 (Bucle Electrónico de Conmutación):** Matriz exterior de tiristores **IGCT** de estado sólido conectados a la jaula inductiva. Operan ubicados en recintos blindados extramuros para ejecutar el Arbitraje Electromagnético (*Bypass*) en milisegundos.
- **Capa 6 (Corsé Magnético Divergente):** Bobinas superconductoras de **NbTi** en formato CICC a **4 K**. Conforman un electroimán exterior de geometría cónica que esculpe pasivamente la caída del campo magnético base desde los **6.0 T** hasta los **0.75 T**, dictando el abanico de expansión del plasma.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física de la Fase 5 se rige por la Ley de Lenz y el acoplamiento inductivo variable. Para proteger la junta de dilatación mecánica, el corsé superconductor mantiene el campo rígidamente estancado a **6.0 T** durante los primeros **0.50 m** del collarín cilíndrico. Solo al ingresar al embudo divergente comienza un decaimiento forzado inductivo hasta los **0.75 T**.

Esta caída del campo abate el colchón de vacío protector y obliga al plasma a expandirse diamagnéticamente. Su radio se incrementa desde los **0.493 m** iniciales hasta ocupar **1.40 m** de radio útil en la boca de salida. Al rozar electromagnéticamente la jaula perimetral de **3.00 m** de diámetro, multiplica el factor de acoplamiento.

El tiempo de tránsito balístico total (t_{dec_total}) que consume el plasmóide para cruzar la tobera completa se calcula a partir de la longitud física extendida y la velocidad cinemática media:

$$t_{dec_total} = \frac{15.50 \text{ m}}{2666 \text{ m/s}} \approx 0.00581 \text{ s (5.81 ms)}$$

A lo largo de estos **5.81 ms**, el paso del inmenso imán del plasma induce un campo electromotriz inverso sobre los anillos de **GlidCop AL-15**. La fuerza de frenado magnetohidrodinámica axial (F_{MHD}) que desacelera el proyectil responde a la interacción de las corrientes inducidas:

$$F_{MHD} = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_z dV$$

Donde $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente parásita inducida en la jaula exterior y $\mathbf{B}$ representa el vector del campo magnético local de la tobera. Este trabajo extrae de forma neta el 60% de la energía cinética del haz ($\eta_{DEC} = 0.60$), reduciendo de forma exacta su velocidad de salida para proteger las cerámicas de la curva posterior:

$$v_{out} = v_{in} \cdot \sqrt{1 - \eta_{DEC}} = 2666 \text{ m/s} \cdot \sqrt{1 - 0.60} \approx 1686.12 \text{ m/s}$$

Dado que cada tubo individual dispara una vez cada **7.5 segundos**, la ventana de relajación térmica es lo bastante amplia como para gestionar el calor acumulado en el metal. La potencia media de pérdida por efecto óhmico disipada en forma de calor residual dentro del cobre (P_{Joule}) es de **0.53 MW** (533,333 W) por tubo.

El caudal másico requerido de Helio Supercrítico ($\dot{m}_{scHe}$) para purgar esta carga calórica continua, sosteniendo un calor específico (C_p) de **5193 J/(kg·K)** y tolerando un salto térmico controlado (ΔT) de **150 K** (entrada a **50 K** y salida a **200 K**), se dimensiona analíticamente:

$$\dot{m}_{scHe} = \frac{P_{Joule}}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{533,333 \text{ W}}{5193 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 150 \text{ K}} \approx 0.68 \text{ kg/s}$$

Mover un caudal continuo de **0.68 kg/s** de gas inerte en fase supercrítica representa una magnitud ultrabaja y perfectamente asumible para el bombeo criogénico parasitario. Al ser el **scHe** eléctricamente neutro, el fluido corre por el interior de los inductores sin experimentar pérdidas de carga magnéticas ni fuerzas de Hartmann restrictivas.

Paralelamente, el trabajo neto recuperado por el freno inductivo no se nutre solo de la inercia lineal, sino principalmente de la violenta expansión térmica del plasma (entalpía) empujando diamagnéticamente contra la caída a **0.75 T**. Esta conversión masiva genera una potencia media sostenida de $\sim 7.1 \text{ MWe}$ por tubo. Al operar bajo el régimen de la Fase Pico (35 tubos activos), el bucle DEC entrega una potencia conjunta de $\sim 248.5 \text{ MWe}$. Este volumen iguala matemáticamente el altísimo consumo de la matriz de inyección de radiofrecuencia (ICRH), abasteciendo el encendido nuclear de forma autónoma y aislando esta colosal carga parasitaria de la red civil, blindando los **271 MWe netos** comercializables de la central.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El funcionamiento de la Tobera Convertidora DEC interactúa de forma directa con los vectores de fricción electromecánica de la planta. Se neutralizan mediante las siguientes contramedidas:

- **Desafío Técnico (Estrés Termoelástico Transitorio y Fractura Diferencial - Ref. Clúster 10, Vector 2):** Desacelerar un plasma a Mach 7.8 inyecta megajulios inductivos en los anillos de cobre. El calor de Joule transitorio obliga al **GlidCop** a expandirse radialmente. Si el cobre estuviera encamisado rígidamente contra su aislante cerámico, la cizalladura reventaría la base dieléctrica de **Si₃N₄**.
- **Contramedida de Diseño:** La central implementa las soluciones combinadas [SV-9.1] y [SV-9.3]. Diluimos el amperaje alargando la tobera, pero la clave mecánica es el *montaje flotante*. Los anillos de cobre no tocan rígidamente la cerámica. El espacio se rellena con el caudal de **scHe** a **200 bar**. Esta capa fluidica asfixia el calor y actúa como amortiguador elástico, permitiendo que el cobre respire sin transmitir tracción a los manguitos.
- **Desafío Técnico (Muro Hidrodinámico por Efecto Espejo Magnético - Ref. Clúster 1, Vector**

1): Intentar desacelerar el plasma obligándolo a avanzar contra un gradiente magnético plano inverso o un muro estático cerrado genera una fuerza de Hartmann retrógrada. El plasma rebotaría elásticamente en sentido inverso hacia la cámara de combustión.

- **Contramedida de Diseño:** La tobera aplica un perfil de expansión magnética forzada que reduce el campo perimetral hasta **0.75 T**. Esta descompresión coordinada obliga al plasma a expandirse radialmente, transfiriendo su energía exclusivamente mediante trabajo inductivo diamagnético sobre la onda viajera. Anula el rebote retrógrado y encauza el escape balístico aguas abajo.
- **Desafío Técnico (Fallo Prematuro por Fusión Local del Inductor - Ref. Clúster 10, Vector 3):** Al ser la frontera de mayor fatiga electromagnética, las bobinas acumulan la mayor probabilidad de sufrir un arco dieléctrico. Si un segmento falla por derretimiento, obligaría a paralizar la facturación comercial de toda la central.
- **Contramedida de Diseño:** La central implementa el arbitraje electromagnético y bypass híbrido [SV-9.4]. Cada anillo de **GlidCop AL-15** opera aislado. Si la telemetría térmica detecta fatiga crítica, la computadora abre el circuito mediante tiristores **IGCT** en **1 ms**. El plasma atraviesa el segmento sin sufrir inducción y su carga es absorbida de forma segura por el **FLiBe** de la Fase 4.
- **Desafío Técnico (Inestabilidad Rotacional Trasera y Arco de Paschen - Ref. Clúster 1, Vector 3):** Frenar la inestabilidad rotacional (modo **n=2**) exige inyectar alto voltaje. Si esta polarización electrostática se ejecutara aguas abajo en los plenums paramagnéticos terminales (**0.62 bar**), se desataría una ruptura dieléctrica instantánea (arco voltaico) contra el chasis de acero.
- **Contramedida de Diseño:** Aplicando la doctrina [SV-8.6], reubicamos los electrodos anulares de Tungsteno y los encastramos en la garganta cilíndrica de entrada (**0.50 m**). Aunque el entorno asume el vacío degradado de la cámara a **10^{-6} Torr**, este valor barométrico se sitúa varios órdenes de magnitud por debajo del mínimo exigido por la Curva de Paschen para la ruptura dieléctrica. Esto garantiza que el entorno siga actuando como un aislante perfecto, permitiendo inyectar kilovoltios de forma remota y segura sin desatar arcos voltaicos contra el chasis.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura de la Fase 5 incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual de ingeniería:

- **[SV-1.8] (Acoplamiento Telescópico Cilíndrico y Retraso Magnético Sincronizado):** Collarín inicial de **0.50 m** que absorbe los **36 cm** de dilatación térmica bajo un campo rígidamente retenido a **6.0 T**, evitando el choque sónico frontal y protegiendo el fuelle UHV exterior.
- **[SV-8.6] (Estabilización Remota por Polarización de Bordes en UHV):** Integración de electrodos anulares de Tungsteno en la embocadura de entrada para inyectar la tensión de estabilización giroscópica. Elude el riesgo de arcos voltaicos al operar en un entorno de vacío profundo antes del decaimiento paramagnético.

- **[SV-9.1] (Topología de Frenado Escalonado y Dilución):** Longitud total extendida a **15.50 m** para abatir la tasa de cambio transitoria de la corriente inducida (dI/dt), protegiendo las cerámicas de base frente a cizalladuras térmicas.
- **[SV-9.2] (Perfil de Divergencia Aerodinámica Acoplada):** Conicidad de la recámara establecida en un ángulo aerodinámico exacto de **2.48°** para optimizar el factor de acoplamiento inductivo diamagnético del plasma.
- **[SV-9.3] (Refrigeración Intrínseca por Helio Supercrítico):** Circuito interno de **scHe** escalado a **0.68 kg/s** continuo y eléctricamente neutro, el cual aprovecha la inmensa ventana de relajación térmica unitaria de 7.5 segundos entre disparos.
- **[SV-9.4] (Arbitraje Electromagnético de Supervivencia):** Aislamiento local de los anillos de cobre mediante tiristores **IGCT** en **1 ms** para transferir la energía sobrante al manto térmico primario ante averías de un sector.
- **[SV-3.2] (Bombeo Diferencial Intersticial):** Bridas provistas de sellos dobles metálicos acoplados a un lazo de vacío medio a **10^{-3} Torr** para blindar la tobera contra el ingreso de aire atmosférico.
- **[SV-3.3] (Tensionadores Hidráulicos Múltiples):** Empleo de abrazaderas mecánicas de tensión hidráulica isótropa. Permiten desacoplar las bridas del fuelle UHV exterior de la tobera en minutos para su extracción ferroviaria hacia la Celda Caliente sin aplicar torsión rotativa de fricción.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño de la Tobera Convertidora DEC repudia de forma estricta los siguientes antipatronos de ingeniería, bloqueando sus mecanismos de fallo:

- **[SD-9.2] (Expansión Geométrica Plana y Sobredimensión):** Dejamos atrás la opción de alargar la tobera por encima de la medida operativa de **15 m**. Un diseño extremadamente dilatado aplana letalmente el ángulo de expansión magnética (∇B). El ensanchamiento radial resulta demasiado débil para interactuar con los anillos exteriores, el plasma conserva su velocidad cinemática completa e impacta frontalmente contra los muros de la chicane (Fase 6), vaporizando la calderería.
- **[SD-9.3] (Jaula de Inducción Monolítica de Impedancia Fija):** Queda prohibido forjar el convertidor directo conformando un único bloque cilíndrico de cobre continuo. El frente de choque del plasma induciría toda su fuerza electromotriz exclusivamente en el primer labio de la embocadura metálica, provocando una asimetría térmica destructiva que imposibilita el aislamiento sectorial ante fallos.
- **[SD-9.4] (Refrigeración Interna con Metales Líquidos):** Evitamos bombear aleaciones metálicas líquidas (Galio o Estaño) por el interior de las bobinas de inducción. El fluido conductor experimentaría el efecto Hartmann al cruzar las líneas de contención magnética de **0.75 T**, sufriendo una pérdida de carga geométrica que bloquearía el caudal de enfriamiento. Al absorber corrientes de Foucault masivas, el metal líquido entraría en ebullición expansiva, agrietando el chasis.

- **[SD-7.10] (Inyección Reactiva Dinámica en Toberas Convertidoras):** Se prohíbe tajantemente la instalación de inyectoros rápidos de gases moleculares o cortinas de plasma bajo los inductores de la tobera. El incremento instantáneo de la densidad iónica elevaría la presión barométrica local, destruyendo el vacío protector dieléctrico de 10^{-8} Torr. Esto abriría vías francas a arcos voltaicos fulminantes que fundirían el convertidor de cobre por cortocircuito total contra el chasis externo.
-

FASE 6 (Codo de Desviación Terminal y Sumidero Balístico) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 6 opera como una chicane cortafuegos y un separador de masa inercial para los residuos de la post-combustión. Su propósito primordial es purificar el flujo de escape mediante un desacople vectorial magnético. Debemos imaginar esta sección como una inmensa tubería fuertemente curvada, dotada de un muro ciego de disipación en su vértice de flexión.

Al ingresar a la curva, el plasma ionizado obedece rígidamente a las líneas de fuerza magnética y gira con suavidad por el conducto. Por el contrario, la metralla atómica y los escombros neutros que han perdido su carga eléctrica ignoran el campo magnético. Continúan su vuelo balístico en línea recta absoluta, estrellándose de forma inofensiva contra el sumidero de tungsteno. Hacia atrás, la curvatura introduce un punto de ceguera geométrica. Este desvío aísla por completo al convertidor DEC y al núcleo del reactor frente al fogonazo ultravioleta y la onda sónica regresiva originados en las etapas de recombinación terminales.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para asegurar el hermetismo barométrico y la continuidad del flujo supersónico remanente, este módulo se gobierna bajo las siguientes fronteras operativas:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Flujo iónico residual expandido y desacelerado, arrastrando una fracción de metralla atómica neutra.
- **Velocidad de crucero:** Tránsito balístico subsiguiente a **1686 m/s**.
- **Temperatura inicial:** Régimen térmico residual frío (desplome adiabático profundo heredado de la extracción electromotriz en la Fase 5).
- **Presión local (Entrada):** Continuidad del gradiente dinámico. Se recibe el vacío transicional a 10^{-7} Torr arrastrado desde la tobera de expansión magnética.
- **Campo magnético de entrada:** Corsé magnético de acoplamiento a **0.75 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Flujo iónico purificado (libre de escombros neutros), manteniendo su carga eléctrica activa y enfilado coaxialmente en el eje de salida hacia el milímetro cero de la Fase 7, donde interceptará de forma estricta la cortina anular de Helio gaseoso.
- **Velocidad de entrega:** Velocidad lineal mantenida estable a **1686 m/s**.
- **Temperatura final:** Conservación del estado térmico residual frío, perfectamente acondicionado para tolerar la inminente inyección de gas de la recombinación terminal sin derretir la calderería.
- **Presión entregada (Salida):** Vacío profundo en recuperación. La proximidad directa a los inmensos plenums de extracción terminal permite que la presión siga descendiendo, acercándose asintóticamente a la línea base de contención de **10^{-8} Torr**.
- **Campo magnético terminal:** Atenuación controlada de salida a **0.50 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

El conjunto del codo terminal y el sumidero balístico adopta una arquitectura de gran calibre. Está diseñada para maximizar la conductancia aerodinámica de los gases expandidos utilizando componentes comerciales de catálogo.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones de la Curva:** La Fase 6 despliega una eslora longitudinal de **13.38 m**. Se instala de forma rígidamente nivelada sobre el plano horizontal X-Y de la planta (cota cero). Adopta un radio de curvatura uniforme y relajado de **25 m**, cubriendo un ángulo de arco exacto de **30.6°**.
- **Desplazamiento Lateral Cortafuegos:** Esta trayectoria curva introduce un desvío asimétrico que desplaza el eje del tubo **3.50 m** de forma lateral. Este desplazamiento supera el diámetro del propio conducto y bloquea cualquier línea de visión directa entre el plenum de gases y la tobera electromagnética.
- **Calibre del Conducto:** Sostiene un diámetro interior macizo y constante de **3.00 m** para facilitar la descompresión fluídica del gas de escape al reducirse el campo magnético.

Mecanismo de Extracción Robótica y Anclaje Estático:

- **Integración Rígida del Sumidero (Cero Fuelles en Zona de Impacto):** Dado que la dilatación masiva del reactor ya fue absorbida por el estator de la Fase 5, el eje óptico de los neutrones hacia la Fase 6 es inmutable. Por ello, el sumidero de Tungsteno no requiere ser un estator independiente. Se suelda e integra de forma rígida y monolítica en la curva de acero del propio módulo de vacío. Esta decisión erradica la necesidad de instalar delicados fuelles elásticos de dilatación en la zona de impacto, eliminando el riesgo de que la metralla supersónica los perfora por abrasión.
- **Sustitución Logística de Sacrificio:** Al concentrar el impacto abrasivo de la metralla, la caja pris-

mática de Tungsteno es un cartucho consumible. Para su mantenimiento, el SCADA detiene el disparo y activa las camisas criogénicas de los bloques colindantes para congelar los sellos de sal fundida (*Freeze Seals*). Una vez aislado el sector, se ejecuta el venteo seco (*Dry Venting*) con gas inerte para anular la succión barométrica. Los tensionadores hidráulicos liberan las bridas perimetrales y una plataforma ferroviaria retira la inmensa caja de Tungsteno deslizándola a **45 grados** hacia la Celda Caliente, ejecutando el recambio de forma bidimensional sin válvulas mecánicas invasivas y sin detener los tubos contiguos.

Matriz Estratigráfica de Componentes (BOM):

- **Componente 1 (Sumidero Balístico Chevron - Estator):** Caja prismática sólida con geometría interna de cuñas (*Chevron*), forjada en **Tungsteno** macizo. Se erige como un bloque independiente anclado a la losa. Aloja canales macroscópicos enfriados por gas **He** a **50 bar**. Aplicando la doctrina [SV-4.1], la temperatura de entrada del gas se regula activamente para garantizar que el chasis de tungsteno opere de forma perenne a una isoterma superior a los **500 °C**. Esta condición térmica sitúa al material en su fase dúctil (por encima de su DBTT), permitiéndole absorber la inercia del impacto de la metralla supersónica sin sufrir fractura frágil ni astillamiento.
- **Componente 2 (Lecho de Disipación Neutrónica):** Compartimento estanco en el reverso del Tungsteno, relleno con guijarros de **Carburo de Boro (B_4C)** para asimilar el hinchamiento por Helio sin fracturar el contenedor.
- **Componente 3 (Cámara de Vacío Móvil):** Cilindro curvo forjado sin costuras en acero **316LN de Grado Nuclear** de ferrita nula. Conectado al sumidero mediante fuelles elásticos de Inconel.
- **Componente 4 (Jaula de Compensación Desacoplada):** Devanado cuadrupolar de cobre **GlidCop AL-15**. Se monta sobre un andamiaje propio asociado al corsé criogénico exterior, manteniéndose mecánicamente desacoplado del chasis de acero móvil para eludir la cizalladura térmica.
- **Componente 5 (Aislamiento Dieléctrico):** Espaciadores cerámicos de **Si_3N_4** entre las bobinas y sus anclajes.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física de la Fase 6 se centra en la anulación pasiva de la deriva por curvatura del plasma y en el balance de disipación termo-mecánica del sumidero de tungsteno frente a la abrasión supersónica.

Obligar a un flujo de partículas cargadas a describir un giro introduce una asimetría magnetohidrodinámica severa. Los iones y los electrones experimentan velocidades de deriva opuestas debido al gradiente del campo magnético local y a la fuerza centrífuga. Esta separación engendra un campo eléctrico transversal **E** que interacciona de forma cruzada con el campo magnético base **B** de **0.75 T**. El fenómeno desata la deriva vertical destructiva ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) que proyectaría el plasma ionizado lateralmente contra el chasis de acero.

La velocidad de deriva por curvatura combinada ($\mathbf{v}_R$) que experimentan las partículas responde a la ecuación analítica del confinamiento toroidal:

$$\mathbf{v}_R = \frac{mv_{\parallel}^2}{qB^2} \frac{\mathbf{R}_c \times \mathbf{B}}{R_c^2}$$

Donde m es la masa de la partícula cargada, $v_{\parallel}$ representa el componente de la velocidad balística paralelo a las líneas de campo fijado en **1686 m/s**, q es la carga elemental, $\mathbf{B}$ es el vector del campo magnético de **0.75 T** y $\mathbf{R}_c$ es el vector del radio de curvatura establecido en **25 m**.

Para evitar este escape, el devanado cuadrupolar de **GlidCop AL-15** retuerce helicoidalmente las líneas de fuerza magnética a lo largo de los **13.38 m** del arco. Los electrones rápidos viajan por las líneas trenzadas y cortocircuitan de forma pasiva las zonas de carga opuesta. Anulan la deriva transversal y permiten al plasma ionizado girar con total estabilidad geométrica.

Paralelamente, la metralla neutra (que ignora el campo magnético) impacta de frente contra el sumidero de tungsteno. A una cadencia incompresible de disparo de **7.5 segundos** por tubo, la potencia térmica neta (P_{dump}) depositada se calcula integrando la inercia cinética del flujo másico despojado de carga a lo largo de su ventana de evacuación:

$$P_{dump} = \frac{1}{2} \dot{m}_{neutros} v_{in}^2$$

Esta colisión periódica y distanciada estabiliza una carga térmica residual de **0.26 MW** (260 kW) por tubo. Aunque este valor es bajo gracias a la gran ventana de relajación temporal, si impactara frontalmente contra un muro plano a Mach 4.9, la densidad de potencia focalizada vaporizaría la primera capa atómica del metal. Para evitar la ablación, las lamas de tungsteno se orientan en un ángulo muy agudo ($\theta_{chevron}$) respecto a la trayectoria del haz.

La ecuación de flujo térmico efectivo (q_{eff}) demuestra cómo la inclinación geométrica diluye el calor sobre un área frontal ($A_{frontal}$) mucho mayor:

$$q_{eff} = \frac{P_{dump}}{A_{frontal}} \sin(\theta_{chevron})$$

Al inclinar las placas de sacrificio a apenas **15°** respecto al vector balístico, el flujo de calor real que experimenta la red cristalina del tungsteno se reduce en más de un 70%. Esta dilución pasiva, combinada con la refrigeración posterior por gas **He** presurizado a **50 bar**, asegura que la superficie refractaria trabaje permanentemente por debajo de su punto de fusión.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El funcionamiento del Codo de Desviación Terminal interactúa de forma directa con los vectores de fricción industrial de la central, mitigados mediante soluciones mecánicas puras:

- **Desafío Técnico (Deriva Vertical por Separación de Cargas - Ref. Clúster 1, Vector 1):** Obligar

a un plasma expandido a superar un codo curvo desata la separación de los electrones y los iones por gradiente, desatando una deriva vertical ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) que fundiría la galería en microsegundos.

- **Contramedida de Diseño:** La central implementa la doctrina [SV-7.3]. El codo superpone un devanado cuadrupolar helicoidal resistivo sobre el chasis. Retuerce las líneas de fuerza obligando a los electrones a describir trayectorias de cortocircuito pasivo, anulando la deriva y guiando el escape de forma mansa.
- **Desafío Técnico (Erosión por Sputtering y Migración de Polvo - Ref. Clúster 14, Vector 2):** Impactar metralla pesada a **1686 m/s** arranca átomos de tungsteno por pulverización catódica (*sputtering*). Si este polvo queda libre, migrará destruyendo el ultra-alto vacío o las bombas criogénicas.
- **Contramedida de Diseño:** Evitamos el impacto frontal mediante la geometría en panal ciego [SV-7.1]. El tungsteno se mecaniza conformando cuñas oblicuas profundas (*Chevron*). Los átomos arrancados rebotan contra la pared enfrentada de la misma cuña y sufren deposición in situ, actuando como una trampa cerrada de polvo.
- **Desafío Técnico (Invasión Retrógrada y Contaminación UHV - Ref. Clúster 14, Vector 1):** Las etapas de recombinación terminal generan un destello fotónico ultravioleta y un martillo acústico regresivo. Si esta onda alcanza la tobera DEC o el núcleo, rompería el UHV y apagaría la central.
- **Contramedida de Diseño:** La máquina interpone el desvío topológico lateral de **3.50 m**, el cual supera el diámetro interior del tubo (**3.00 m**), eliminando la línea de visión directa. Las ondas sónicas y fotones UV se estrellan inofensivamente contra los flancos curvos del acero, actuando como un cortafuegos pasivo absoluto.
- **Desafío Técnico (Abrasión de Fuelles por Metralla Supersónica):** Si el sumidero de Tungsteno se desacoplara del chasis de vuelo utilizando juntas de expansión (como ocurre en las transiciones de otras fases), la lluvia de metralla neutra que rebota a **1686 m/s** impactaría contra las finas ondulaciones de Inconel de los fuelles, perforándolos en horas y colapsando el UHV.
- **Contramedida de Diseño:** El sumidero se forja en el propio chasis curvo. Al operar aguas abajo de la Fase 5 (que fija la línea de tiro actuando como estator), la Fase 6 no experimenta desplazamientos axiales que saquen a su escudo del eje óptico. Esto permite blindar la cámara con calderería pesada de pared gruesa ininterrumpida, carente por completo de juntas elásticas en la zona de dispersión balística.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura de la Fase 6 incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual de ingeniería:

- **[SV-7.3] (Codo de Desviación Terminal con Compensación Dog-Leg):** Aplicada al integrar el devanado cuadrupolar helicoidal sobre el campo de **0.75 T** para anular de forma pasiva la deriva vertical de cargas iónicas.

- **[SV-7.1] (Sistema de Defensa Pasiva en Chicane / Chevron):** Integrada al blindar el vértice de colisión mediante cuñas oblicuas de **Tungsteno** refrigeradas activamente por gas **He**, diluyendo el flujo térmico efectivo y erradicando el escape de polvo por sputtering.
- **[SV-3.2] (Bombeo Diferencial Intersticial):** Uso de bridas modulares provistas de un sello doble metálico acoplado a un lazo de vacío medio a 10^{-3} Torr para blindar las juntas contra microfugas atmosféricas hacia el canal limpio.
- **[SV-1.4] (Rodadura Pasiva en "V" Truncada):** Carriles inferiores provistos de un canal longitudinal hueco de escape. Permiten el desplazamiento logístico del cartucho móvil de la cámara de vacío por dilatación térmica sin sufrir soldadura galvánica por fricción en seco.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño del Codo de Desviación Terminal rechaza de forma estricta los siguientes antipatronos de ingeniería, bloqueando sus mecanismos de fallo:

- **[SD-7.4] (Arquitectura de Impacto Directo y Superficies Planas):** Descartamos el uso de muros de choque frontales planos y perpendiculares a la trayectoria balística de los residuos. Forzar un impacto ortogonal desata un retroceso elástico supersónico que inunda el conducto con metralla, destruye las tejas cerámicas situadas aguas arriba y concentra la densidad de energía provocando la fusión ablativa de la pared de sacrificio.
- **[SD-7.5] (Guiado de Plasma en Solenoides Curvos Simples):** Evitamos intentar guiar el haz iónico instalando únicamente imanes curvos convencionales llanos sin compensación cuadrupolar. Carecer de trenzado magnético desata de forma instantánea la separación de cargas polares. El plasma ignora el falso centro sónico curvo y experimenta una deriva vertical fulminante que lo estrella transversalmente contra la pared exterior de acero.
- **[SD-7.1] (Trampas Electrostáticas Pasivas para Polvo):** Dejamos atrás la colocación de placas cargadas o rejillas electrostáticas pasivas alrededor del conducto con la intención de atraer el polvo de tungsteno residual. A la inmensa intensidad magnética del reactor, las variables electrostáticas menores resultan completamente inútiles. Las partículas cargadas ignoran las placas obedeciendo exclusivamente al vector de Lorentz de los **0.75 T**, lo que provocaría acumulaciones caóticas de metralla metálica sobre los cerámicos dieléctricos.

FASE 7 (Tubo de Deriva) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 7 opera como el amortiguador espacial y la cámara de recombinación volumétrica de la central. Su propósito es neutralizar eléctricamente el plasma residual y proporcionar el volumen de expansión

necesario para ahogar la onda de presión sónica generada por el disparo. Debemos imaginar este módulo como un inmenso túnel completamente hueco y libre de campos magnéticos, que actúa como el silenciador final del reactor.

Al abandonar la chicane cortafuegos, el plasma se acerca a una zona donde el campo estabilizador desaparece. Para evitar que el haz se expanda infinitamente y se estrelle contra el acero, la fase inyecta una nube de gas neutro frío. El plasma choca contra esta diana, roba sus electrones y pierde su carga eléctrica. Al perder su memoria magnética de forma prematura, el proyectil transiciona pacíficamente hacia un gas aerodinámico neutro y se expande inofensivamente a lo largo del tubo, protegiendo la calderería y alejando la instrumentación de cualquier interferencia electromagnética residual.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para aislar termodinámicamente el núcleo y acondicionar el flujo hacia los sistemas de vacío terminales, este módulo se gobierna bajo las siguientes fronteras de interfaz:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Flujo iónico purificado de metralla neutra, sometido a transición hacia zona de cero Teslas.
- **Velocidad de crucero:** Tránsito balístico de entrada a **1686 m/s**.
- **Temperatura inicial:** Régimen térmico residual frío (heredado intacto tras el tránsito balístico por la chicane de la Fase 6).
- **Presión local:** Régimen de vacío perturbado transitoriamente por la inyección de la diana de gas.
- **Campo magnético de entrada:** Empalme coaxial estricto en la frontera isomagnética de **0.50 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Gas aerodinámico neutro, despojado de carga eléctrica y termalizado.
- **Velocidad de entrega:** Flujo supersónico atenuado por la expansión volumétrica masiva.
- **Temperatura final:** Termalización absoluta. La colisión inelástica con la inyección volumétrica de gas Helio diluye la ínfima entalpía cinética residual del flujo. Transiciona el plasma agotado hacia un volumen de gas neutro tibio, perfectamente acondicionado para no dañar la calderería paramagnética convencional.
- **Presión entregada:** Onda sónica amortiguada y estabilizada para su entrega al plenum colector estático.
- **Campo magnético terminal:** Entorno paramagnético puro de **0 T** (absolutamente desmagnetizado).

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

El Tubo de Deriva adopta una macro-geometría totalmente hueca, desprovista de protecciones cerámicas de sacrificio o inductores de cobre, utilizando componentes de catálogo para maximizar el volumen de descompresión acústica.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Dimensiones Base:** El módulo despliega una longitud recta ininterrumpida de **15 m**. Se instala rígidamente nivelado en cota cero sobre el plano horizontal X-Y de la central. Sostiene un diámetro interior útil masivo de **3.00 m** y un diámetro exterior de **4.00 m**.
- **Volumen Libre:** Esta configuración de cilindro hueco aporta aproximadamente **106 m³** de volumen expansivo puro. Su interior carece por completo de tejas de primera pared, desviadores u obstáculos físicos aerodinámicos.
- **El “Milímetro Cero” (Inyección Supersónica en Sombra):** Exactamente en la línea de transición geométrica que empalma con la Fase 6, se instala el colector de inyección de Helio. Para evitar que el gas retroceda y contamine el vacío de las etapas de alto voltaje, la inyección repudia las nubes radiales simples. Emplea un anillo de **toberas convergentes-divergentes (Laval)** anguladas rígidamente a **45° hacia adelante** (en la dirección del flujo). Para eludir la abrasión por el plasma a **1686 m/s**, estas toberas se ocultan en un receso perimetral en sombra aerodinámica. Disparan una cortina supersónica direccional que conforma una válvula de momento lineal, garantizando que el 100% del Helio fluya exclusivamente hacia la recámara estática (Fase 8).

Mecanismo de Extracción Robótica y Aislamiento Cinemático:

- **Desacople Acústico Total:** El Tubo de Deriva es la zona de mayor violencia vibratoria de la central. Para proteger el ultra-alto vacío, la Fase 7 opera como una “isla mecánica”. Se conecta a la Fase 6 y a la Fase 8 exclusivamente mediante colosales fuelles perimetrales multicapa (*Edge-Welded Bellows*). Estos fuelles actúan como cortafuegos cinemático: retienen el vacío absoluto pero impiden que el martillo acústico de **4 Hz** viaje hacia el resto de la planta.
- **Suspensión de Extracción Rápida:** La pieza descansa libremente sobre cunas de amortiguación. Para extraerla, los manipuladores simplemente aflojan las abrazaderas de los fuelles, elevan la pieza de sus cunas y la retiran lateralmente con grúa puente sin necesidad de desmontar raíles complejos.

Matriz Estratigráfica de Componentes (BOM):

- **Componente 1 (Chasis Estructural de Vacío):** Cilindro masivo de contención forjado sin costuras en acero inoxidable **316LN de Grado Nuclear**. Actúa como cámara desnuda de expansión, ofreciendo su vasta superficie interior para absorber el tenue destello ultravioleta y el remanente calórico inofensivo de la neutralización iónica.
- **Componente 2 (Fuelles UHV de Cortafuegos):** Uniones flexibles extremas mecanizadas en aleación Inconel 625, diseñadas para tolerar millones de ciclos de compresión/extensión sin fatiga

en el cordón de soldadura, aislando el rebote de la pieza.

- **Componente 3 (Amortiguadores Macizos):** Cunas de apoyo basadas en resortes de **Inconel 718** combinados con zapatas de fricción viscoelástica (capaces de operar a las temperaturas cálidas del recinto). Disipan la energía cinética del rebote acústico transformándola en calor leve, estabilizando el tubo.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física de la Fase 7 repudia el frenado mecánico para abrazar la cinética atómica pura. El problema fundamental radica en la ley de conservación del flujo magnético. El plasma abandona la Fase 6 confinado por un campo de **0.50 T**. Sin embargo, la Fase 8 (Plénium Terminal) exige un entorno magnético de **0 T** para proteger sus componentes mecánicos.

Si el plasma ionizado fluyera pasivamente hacia una zona donde el campo desaparece, las partículas cargadas obedecerían la ley de conservación transversal. Esta ley relaciona el radio del plasma (r_p) con la intensidad del campo magnético local (B):

$$r_p \propto \frac{1}{\sqrt{B}}$$

Si el campo B tiende matemáticamente a cero, el radio del plasma tiende a infinito. El haz sufriría una divergencia explosiva instantánea, estrellando su inercia calórica a Mach 4.9 contra las paredes de acero.

Para erradicar esta expansión magnética divergente, el SCADA ejecuta el Desprendimiento Magnético (*Plasma Detachment*). Inyecta una cortina supersónica direccional de Helio gaseoso frío a alta presión (“Diana de Gas”) exactamente en la frontera isomagnética. El vector de velocidad del Helio inyectado apunta estrictamente aguas abajo, creando un arrastre inercial (bloqueo aerodinámico) que impide físicamente a las moléculas de gas retroceder hacia la tobera electromagnética, blindándola contra arcos de Paschen. Los iones rápidos de D-T colisionan inelásticamente por detrás con estos átomos de Helio y capturan sus electrones mediante recombinación volumétrica inmediata.

La velocidad de entrada de **1686 m/s** representa exclusivamente el vector cinemático de impacto en la frontera. En microsegundos, al estrellarse contra la diana inyectada, el plasma se vuelve eléctricamente neutro. Al perder su carga, pierde automáticamente su acoplamiento con las líneas de fuerza y se desvincula de las leyes de confinamiento de Lorentz. La masa abandona su comportamiento de proyectil balístico y se transforma en un frente de presión de gas molecular. Su colosal inercia lineal se convierte de inmediato en trabajo de expansión térmica y turbulencia aerodinámica. El fluido experimenta una deceleración abrupta, llenando inofensivamente el espacio libre a medida que la onda sónica se ahoga en el volumen del tubo.

El segundo proceso clave de la Fase 7 es el ahogamiento de esta onda acústica. Cada disparo termonuclear a **4 Hz** empuja una masa de gas que actúa como un martillo neumático. Para disipar esta presión, el tubo de deriva proporciona un inmenso volumen expansivo cilíndrico (V_{deriva}):

$$V_{\text{deriva}} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot (1.50 \text{ m})^2 \cdot 15 \text{ m} \approx 106.02 \text{ m}^3$$

Obligar al gas de escape a transitar por un depósito hueco de más de **106 m³** permite que la onda sónica se expanda volumétricamente. Siguiendo las leyes de termodinámica de gases, la presión estática cae drásticamente. Esto acondiciona y aplana el flujo para que alcance el colector final estático sin reventar sus finas toberas perimetrales de bombeo de ultra-alto vacío.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El funcionamiento del Tubo de Deriva neutraliza las fricciones estructurales del final del reactor mediante el uso intensivo de la geometría pasiva y la química de colisiones:

- **Desafío Técnico (Expansión Magnética Radial Infinita - Ref. Apartado 3.2, Fase 7):** Transicionar el flujo de escape desde la botella magnética hacia el bloque de bombeo paramagnético civil provoca que las líneas de fuerza diverjan al tender a cero Teslas. Las partículas cargadas siguen ciegamente estas líneas y se ensanchan hasta colisionar con violencia térmica contra el chasis de acero, vaporizando el material.
- **Contramedida de Diseño:** La máquina aniquila este fenómeno aplicando la doctrina [SV-7.4]. Sincroniza la inyección de una “Diana de Gas” de Helio exactamente en el origen del tubo, a **0.50 T**. La neutralización eléctrica ocurre en microsegundos, forzando la pérdida de memoria magnética de las partículas. Al volverlas moléculas neutras, eluden la expansión destructiva radial y viajan con docilidad aerodinámica.
- **Desafío Técnico (Inducción Foucault en Maquinaria de Vacío - Ref. Apartado 3.2, Fase 7):** La maquinaria de respiración del reactor confía en turbobombas MagLev. Si estas máquinas operaran cerca del embudo magnético, las pulsaciones a **4 Hz** inducirían fuerzas de frenado galvánico y calor de Joule en los rotores en levitación, reventándolos por fricción en seco.
- **Contramedida de Diseño:** Aislamos estas máquinas delegando a la Fase 7 la tarea de ser un escudo espacial. Empujar el Plénium Terminal **15 metros** aguas abajo desploma las isogaussas de Lorentz a la nulidad absoluta. El entorno paramagnético (**0 T**) protege activamente la mecatrónica extra-muros frente a corrientes inducidas.
- **Desafío Técnico (Hidruración y Soldadura de Muelles en UHV - Ref. Doctrina Metalúrgica 6.4):** Para amortiguar los martillazos acústicos isocóricos a la cadencia de la central, el tubo debe flotar sobre resortes. Utilizar cables trenzados de acero genera soldadura en frío por fricción en vacío (*Galling*), y la exposición al Tritio fragiliza la red cristalina del acero común (hidruración).
- **Contramedida de Diseño:** La central aplica la solución de resistencia pura [SV-4.2]. Toda la amortiguación recae sobre resortes mecanizados mediante electroerosión a partir de bloques macizos monolíticos de **Inconel 718**. Esta superaleación base Níquel carece de hebras trenzadas y rechaza

pasivamente la hidruración atómica.

- **Desafío Técnico (El Martillo Acústico a 4 Hz y la Cizalladura de Bridas - Ref. Doctrina Balística 6.7):** Al desaparecer el campo magnético, la ráfaga de gas supersónico impacta y genera una onda de choque mecánica a **4 Hz**. Si la Fase 7 estuviera rígidamente abridada al resto de la planta, induciría fatiga de alto ciclo (*High-Cycle Fatigue*) en los tornillos de vacío, reventando los sellos.
- **Contramedida de Diseño:** Aplicamos un aislamiento cinemático estricto. La Fase 7 se suspende en un lecho de amortiguación, otorgándole libertad de movimiento (X, Y, Z). La continuidad del ultra-alto vacío se salva utilizando fuelles corrugados masivos perimetrales, los cuales absorben el rebote mecánico de la pieza sin transmitir tensión de cizalladura a los estatores contiguos.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura de la Fase 7 incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual de ingeniería:

- **[SV-7.4] (Recombinación Volumétrica y Diana de Gas Neutro):** Inyección frontal supersónica de Helio para despojar al plasma de su carga iónica y ejecutar el desprendimiento magnético (*Plasma Detachment*) seguro.
- **[SV-4.2] (Muelles Monolíticos de Inconel 718):** Resortes mecanizados a partir de bloques macizos no trenzados para soportar el tubo amortiguador eludiendo la soldadura en frío y la hidruración por Tritio.
- **[SV-3.2] (Bombeo Diferencial Intersticial):** Uso de bridas modulares masivas provistas de un sello doble metálico acoplado a un lazo de vacío a 10^{-3} Torr para blindar la unión estructural frente al empuje barométrico de la nave.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño del Tubo de Deriva repudia de forma estricta los siguientes antipatronos de ingeniería, bloqueando sus mecanismos de fallo intrínsecos:

- **[SD-7.6] (Expansión Magnética Pasiva hacia Zonas de Cero Teslas):** Descartamos apagar pasivamente el campo magnético confiando en una transición aerodinámica simple. Asumir este atajo obliga a la inmutable conservación matemática del flujo magnético radial. El radio del plasma iónico base cargado crecería hasta el infinito de forma explosiva, vaporizando la frontera metálica del tubo en microsegundos.
- **[SD-7.7] (Sobreingeniería Terminal Post-DEC):** Evitamos caer en la trampa de instalar divertores complejos de metal líquido o redes intrincadas para recuperar calor. El remanente térmico final que llega a esta fase es de bajísima entalpía. Su aprovechamiento exige intercambiadores masivos con eficiencias de Carnot pírricas que estrangularían el OPEX y entorpecerían la evacuación de cenizas, resultando en un esfuerzo financiero totalmente improductivo para la planta.

- **[SD-4.1] (Sellos Perimetrales de Elastómeros O-rings):** Queda terminantemente prohibido utilizar juntas tóricas de base polimérica (Viton, Silicona, Teflón) como barrera externa de vacío en las bridas de diámetro masivo de este módulo. La radiación ultravioleta remanente de la recombinación y los neutrones rezagados rompen sus enlaces covalentes. Los plásticos fracasan por agrietamiento repentino, perdiendo la estanqueidad molecular en horas y destruyendo el régimen de la planta.
 - **[SD-7.11] (Sobreingeniería de Absorción en Zonas de Recombinación):** Queda prohibido instalar camisas térmicas interiores, manguitos de cobre o circuitos de agua presurizados dentro del Tubo de Deriva para intentar absorber activamente el destello ultravioleta de la recombinación volumétrica. La densidad de energía del *flash* UV se diluye sobre los más de **140 m²** de superficie de la cámara hueca y carece de entalpía para comprometer el acero. Introducir masa metálica y agua en un módulo sometido a extrema vibración acústica garantiza la rotura por fatiga (*High-Cycle Fatigue*) y la contaminación letal del ultra-alto vacío. El tubo debe permanecer desnudo y completamente hueco.
-

FASE 8 (Plenum Terminal) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 8 opera como el colector pasivo final y el anclaje termomecánico de la central. Su propósito es recibir el gas neutro tibio proveniente del tubo de deriva, absorber el impacto de su onda acústica residual y enrutar las moléculas hacia el ecosistema de respiración UHV. Debemos imaginar este módulo como una bóveda estática de calderería ciega, completamente desmagnetizada y libre de instrumentación activa.

El gas accede a esta recámara habiendo sido despojado previamente de su carga eléctrica y de casi toda su entalpía térmica en las etapas anteriores. Su única misión es absorber de forma geométrica el pico de presión del disparo, ejecutando su tarea sin emplear una sola pieza móvil y garantizando la evacuación volumétrica en el límite incompresible de **7.5 segundos**. Al operar como un entorno paramagnético muerto, delega todo control de voltaje a las fases previas, funcionando exclusivamente como el pulmón estructural de cierre del reactor.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para salvaguardar la integridad de las soldaduras frente a los pulsos de presión y enrutar el volumen muerto hacia la Fase 9, este módulo se gobierna bajo las siguientes fronteras de interfaz:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Gas neutro termalizado y expandido procedente del tubo de deriva.

- **Velocidad de crucero:** Flujo subsónico y subsidente (inercia balística atenuada por la expansión volumétrica masiva previa).
- **Temperatura inicial:** Régimen térmico residual frío (entalpía diluida y agotada).
- **Presión local:** Impacto de la onda de presión acústica del disparo estabilizada a un máximo de **0.62 bar**.
- **Campo magnético de entrada:** Transición paramagnética absoluta acoplada a **0 T**.

Output (Salida lateral hacia Fase 9):

- **Estado de la materia:** Gas estático distribuido mecánicamente hacia las bocas de succión perimetrales.
- **Velocidad de entrega:** Velocidad de arrastre molecular dócil (gobernada por la succión de los sopladores Roots).
- **Temperatura final:** Termalización directa a temperatura ambiente absorbida por las camisas de fluido convencionales.
- **Presión entregada:** Caída barométrica guiada desde los **0.62 bar** del disparo hacia la matriz de vacío.
- **Campo magnético terminal:** Entorno paramagnético puro mantenido a **0 T**.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

Integración Geométrica y Colectores Estáticos:

- **Colectores Laterales Aerodinámicos:** El perímetro cilíndrico del plenum integra grandes bridas transversales abiertas de forma permanente hacia el exterior. Para eludir el estrangulamiento de la conductancia provocado por vórtices, estas embocaduras repudian los cortes a 90 grados. Se forjan con **chaflanes de transición acampanados**. Esta guía aerodinámica canaliza el volumen muerto de forma dócil y laminar hacia los sopladores Roots y turbobombas de la Fase 9, asegurando el vaciado en la ventana estricta de **7.5 segundos**.

Matriz Estratigráfica de Componentes (BOM):

- **Componente 1 (Chasis de Vacío del Plenum):** Envolvente cilíndrica recta de contención forjada en acero inoxidable austenítico **316LN de Grado Nuclear**. El extremo final repudia la geometría semiesférica para evitar la formación de un foco acústico reflectivo. Se remata en un **domo elipsoidal (relación 2:1)**. Esta curvatura industrial dispersa los vectores de la onda de choque rebotada hacia los flancos cilíndricos, aniquilando las ondas estacionarias destructivas a **4 Hz** y protegiendo las soldaduras. Crucialmente, su inmenso diámetro interior de **3.00 m** se aprovecha para forrar las paredes laterales cilíndricas con gran parte de los **50 m²** de módulos de captación química activa (NEG), aprovechando el volumen de estancamiento para abatir la carga isotópica in situ antes

de la succión periférica.

- **Componente 2 (Camisa de Refrigeración Termalizadora):** Envoltura de calderería secundaria exterior soldada al chasis, por la que circula agua desionizada a alta presión (o Helio gaseoso). Absorbe el calor residual de bajo nivel transferido por el estancamiento aerodinámico del gas neutro tibio.
- **Componente 3 (Soportes Sísmicos Rígidos):** Anclajes estáticos estructurales que clavan la bóveda a la losa de hormigón de la central. A diferencia de las fases anteriores (que flotan o deslizan), la Fase 8 actúa como el ancla trasera inamovible de la tubería, forzando a los fuelles elásticos de la Fase 7 a absorber toda la energía cinética de expansión longitudinal.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física de la Fase 8 debe resolver la absorción del martillo acústico de forma estrictamente pasiva. Cada disparo de fusión empuja una masa de gas que golpea el final de la galería a **4 Hz**. Para evitar que la presión rompa las delgadas palas de las turbobombas perimetrales, el pleno estático aloja la expansión.

El volumen interno disponible en el plenum (V_{plenum}) para recibir este pico barométrico se determina por su geometría de **3.00 m** de diámetro (radio de **1.50 m**) y **5 m** de longitud:

$$V_{plenum} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot (1.50 \text{ m})^2 \cdot 5 \text{ m} \approx 35.34 \text{ m}^3$$

Estos **35.34 m³** actúan como una zona de estancamiento. Al ingresar en este tanque, la onda de presión sónica se equilibra con el volumen del tubo de deriva previo, estabilizándose en un umbral inofensivo de **0.62 bar**. Esta descompresión acondiciona el gas neutro para que el sistema de vacío periférico pueda absorberlo y filtrarlo a lo largo de los **7.5 segundos** de la ventana incompresible del ciclo respiratorio, evitando turbulencias destructivas o flujos de retroceso.

Operar una recámara que fluctúa desde un pico de estancamiento de **0.62 bar** (aprox. **465 Torr**) hasta el vacío profundo de **10⁻⁸ Torr** en apenas **7.5 segundos** implica un riesgo eléctrico severo. Durante esta violenta caída barométrica, el gas en expansión transita obligatoriamente por el mínimo de la curva de Paschen, momento transitorio en el cual su rigidez dieléctrica colapsa por completo. Introducir altos voltajes o electrodos en este sector desataría arcos voltaicos instantáneos contra el chasis de acero en cada ciclo de bombeo. Esto ratifica la obligación de delegar todo el control eléctrico de bordes a las fases de ultra-alto vacío permanente ubicadas aguas arriba, confirmando a este plenum como una zona de exclusión electromagnética total (**0 T** y **0 V**).

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El funcionamiento del Plenum Terminal neutraliza la violencia isocórica remanente aplicando soluciones de estática pura:

- **Desafío Técnico (Fatiga Acústica de Alto Ciclo por Impacto Supersónico - Ref. Apartado 3.2, Fase 8):** Cada disparo inyecta un frente de onda expansiva que actúa como un martillo neumático. Si el plenum terminal contuviera desviadores angulados, álabes directores o cualquier pieza mecánica interna, la fatiga de alto ciclo fracturaría los anclajes y pulverizaría los componentes en cuestión de semanas, colapsando el túnel por fatiga mecánica.
- **Contramedida de Diseño:** El módulo asume la doctrina absoluta de **Cero Componentes Móviles**. La geometría de bóveda semiesférica cóncava distribuye la tensión del impacto de **0.62 bar** de manera isótropa (uniforme) a lo largo de toda la estructura de acero macizo **316LN**. Acondiciona el gas de escape de forma puramente volumétrica y dócil hacia las toberas de succión laterales sin requerir compuertas o válvulas oscilantes sometidas a desgaste.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura de la Fase 8 incorpora y fundamenta las siguientes directrices de éxito:

- **[SV-7.2] (Plenum Terminal Estático - Fase 8):** Aplicada de forma estricta al diseñar un colector pasivo abovedado de acero austenítico de **5 m**, paramagnético y sin piezas móviles, cuya misión exclusiva es recibir y estancar el gas neutro para su evacuación.
- **[SV-3.2] (Bombeo Diferencial Intersticial):** Uso preventivo de bridas modulares masivas con sello doble de metal acoplado a un lazo de vacío a **10^{-3} Torr** para blindar la unión contra la presión atmosférica del edificio.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño del Plenum Terminal repudia tajantemente los siguientes antipatrones de ingeniería, blocking el colapso de sus componentes:

- **[SD-7.7] (Sobreingeniería Terminal Post-DEC Divertores Líquidos y ORC):** Se prohíbe la instalación de divertores de absorción de neutrones forjados en Plomo-Litio o redes de Ciclos Orgánicos de Rankine. Dado que la potencia neutrónica ya se capturó aguas arriba y la cinética se extrajo en la Fase 5, el remanente en este punto es insignificante. Emplear un tanque estático ciego resulta suficiente, eludiendo la contaminación del vacío por vapores de metal líquido y la quiebra financiera que implicaría construir bucles térmicos inútiles.
- **[SD-8.7] (Electrodos de Control en Zonas Paramagnéticas o de Alta Presión):** El diseño de la Fase 8 prohíbe la instalación de matrices de alto voltaje en su interior. Al recibir la onda de choque a **0.62 bar**, la presión local provocaría un arco voltaico fulminante contra la bóveda de acero. La ausencia total de campo (**0 T**) hace físicamente imposible conectar la corriente con el plasma, ratificando a este plenum como una zona de exclusión electromagnética total.

FASE 9 (Ecosistema de Respiración UHV y Reciclaje Isotópico) - Especificación de Arquitectura, Física, Ingeniería y Materiales

§ 1. Resumen Operativo y Misión Física

La Fase 9 funciona como los pulmones y la refinería atómica en tiempo real de la central térmica. Su misión principal es abatir la presión del gas de escape alojado en el plenum terminal y restaurar el ultra-alto vacío del reactor en un límite incompresible de **7.5 segundos**. Fallar en esta ventana temporal estrellaría el siguiente proyectil de plasma contra un muro de gas, apagando la central.

Para lograr esta evacuación sin requerir un número físicamente imposible de rotores mecánicos, el sistema divide el trabajo. Delega la absorción masiva del combustible directamente a la química de las paredes de la cámara central. La Fase 9 se encarga exclusivamente de extraer las cenizas inertes de Helio, purificar el flujo succionado a través de membranas metalúrgicas y reinyectar el Deuterio-Tritio prístino hacia los inyectores, cerrando el ciclo de la planta de forma ininterrumpida.

§ 2. Fronteras de Transferencia Estricta (Input / Output)

Para blindar el ritmo respiratorio de la máquina y la pureza isotópica del ciclo de combustible, este ecosistema de bombeo se rige por las siguientes fronteras mecánicas:

Input (Entrada):

- **Estado de la materia:** Gas molecular frío y neutralizado, procedente del estancamiento aerodinámico.
- **Velocidad de captación:** Succión desde régimen estático a **0 m/s**.
- **Presión local:** Régimen dinámico de acumulación post-disparo a **10^{-3} Torr**.
- **Frecuencia operativa:** Ciclo de vaciado estricto por tubo sincronizado a la cadencia de **7.5 s**.
- **Campo magnético de entrada:** Entorno paramagnético civil a **0 T**.

Output (Salida):

- **Estado de la materia:** Gases segregados. Combustible diatómico puro al 99.99% y Helio-4 inerte aislado.
- **Temperatura final:** Flujo elevado transitoriamente a **400 °C** en los difusores catalíticos.
- **Presión entregada:** Restauración de la línea base prístina del reactor a **10^{-8} Torr**.
- **Eficiencia de reciclaje:** Retención y purificación ininterrumpida del Tritio para reinyección.

§ 3. Anatomía, Extracción y Matriz de Materiales (BOM)

El sistema de vacío descarta las configuraciones de succión centralizada con estrangulamientos ciegos. Adopta una arquitectura de evacuación perimetral distribuida que maximiza la conductancia aerodinámica, empleando exclusivamente maquinaria de catálogo.

Integración de Geometría y Ejes:

- **Colectores de Aspiración:** El sistema se acopla a las galerías laterales de **3.00 m** de diámetro que nacen de la Fase 8. Estos inmensos conductos minimizan la fricción molecular y conectan directamente con los módulos de bombeo ubicados en cota cero dentro de los pasillos logísticos.
- **Bifurcación UHV:** La red de extracción se ramifica. Un lazo conduce a las criotrapas para inmovilizar físicamente el gas inerte. Otro lazo transita hacia la compresión de respaldo y las celdas de calentamiento para su posterior difusión química.

Mecanismo de Extracción Robótica y Modularidad Terrestre:

- **Modularidad en Patines (*Skids*):** Las turbobombas y las celdas difusoras se montan sobre palés estandarizados. Ante el aviso de telemetría por fatiga mecánica, pesadas válvulas de guillotina UHV Todo-Metal aíslan por completo el patín afectado del resto de la línea.
- **Sustitución en Caliente:** Tras liberar los tensionadores hidráulicos perimetrales, vehículos de guiado automático (AGV) retiran el palé averiado de forma horizontal. Lo sustituyen por una unidad limpia pre-calibrada en minutos, sosteniendo la respiración del cañón sin detener los clústeres operativos.

Secuencia Rotativa de Regeneración Criogénica:

Para erradicar las paradas de planta, las galerías de fisisorción se fragmentan en cuatro cuadrantes paralelos estancos, aislados por compuertas UHV de accionamiento MagLev. Durante la ventana operativa, tres cuadrantes mantienen sus compuertas abiertas, absorbiendo las cenizas y abatiendo la presión. El cuarto cuadrante permanece cerrado: sus paneles se calientan localmente a **80 K** para liberar el Helio-4 atrapado, el cual es succionado hacia el exterior por bombas de tornillo de respaldo. El SCADA rota el cuadrante en regeneración garantizando una capacidad de succión al 100% perenne.

Matriz Estratigráfica de Componentes (BOM):

- **Capa 1 (Cortafuegos Infrarrojo - Escudo Chevron):** Antes de llegar a las zonas de 4 K, el gas atraviesa una rejilla geométrica en forma de persiana entrelazada (*Blind Chevron*), forjada en Cobre y refrigerada por Nitrógeno Líquido a **77 K**. Bloquea la radiación infrarroja térmica del reactor, pero ofrece alta conductancia geométrica para el tránsito de las moléculas.
- **Capa 2 (Evacuación UHV):** Matriz perimetral de turbobombas de levitación magnética (MagLev) de grado industrial, sin rodamientos mecánicos de fricción ni lubricación orgánica en la zona de vacío.

- **Capa 3 (Secuestro de Cenizas):** Paneles de criosorción forjados en matrices de Carbón Activado, protegidos tras los escudos Chevron y refrigerados por Helio líquido a una isoterma extrema de **4 K** para inmovilizar el Helio-4.
- **Capa 4 (Evacuación Viscosa de Respaldo):** Sopladores secos tipo Roots y bombas de tornillo helicoidal (*Dry Scroll*) encargados de pre-comprimir el gas succionado y evacuar los cuadrantes en regeneración.
- **Capa 5 (Refinería Isotópica):** Difusores capilares de Paladio-Plata (**Pd-Ag**), confinados dentro de hornos estáticos operativos a **400 °C**.
- **Cañerías Estructurales del Bucle:** Tuberías masivas forjadas sin costuras en superaleación **MP35N** (Ni-Co-Cr-Mo), aportando inmunidad absoluta frente a la fragilización atómica inducida por el Tritio.

§ 4. Termodinámica, Electromagnetismo y Ecuaciones Rectoras

La física primordial de la Fase 9 exige abatir la presión del volumen total del reactor de forma casi instantánea. El volumen interno auditado de toda la galería balística (V) alcanza los **602,320 L**. Tras el disparo, la presión residual (P_1) salta a **10^{-3} Torr**. El sistema debe hundir este valor hasta el ultra-alto vacío (P_2) de **10^{-8} Torr** en una ventana temporal estricta incompresible de $t = 7.5$ s. El cálculo de la Velocidad de Bombeo Efectiva (S_{eff}) requerida se fundamenta en la ecuación clásica de evacuación de volúmenes en régimen molecular:

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Sustituyendo las magnitudes fundacionales de la arquitectura RIF:

$$S_{eff} = \frac{602320}{7.5} \ln(10^5) \approx \mathbf{924,595 \text{ L/s}}$$

Abatir la presión a un ritmo de casi un millón de litros por segundo utilizando exclusivamente succión aerodinámica desde un extremo del reactor es materialmente imposible debido a la falta de arrastre viscoso en el vacío profundo. Para resolver este colosal límite barométrico, la arquitectura se apoya en el Transporte Balístico de Masa ([SV-3.4]). El FRC acarrea el inventario de gas y lo deposita en los inmensos plenums terminales. Al concentrar el gas en estas zonas frías extramuros (Fases 8 y 9), el sistema despliega baterías de paneles reactivos de aleación **Zr-V-Fe** (NEG). Operando a una isoterma óptima de **200 °C**, un área escalada de **50 m²** de estos paneles proporciona una succión química focalizada de **1,000,000 L/s** para los isótopos de hidrógeno, aplastando matemáticamente la necesidad de succión mecánica y blindando el margen de seguridad de la planta.

Al delegar la captura masiva del Hidrógeno a estos paneles químicos locales, la Fase 9 se libera de la carga. Sus turbobombas MagLev y paneles de carbón a **4 K** solo necesitan concentrarse en capturar el Helio-4 inerte (que ignora el NEG) y el remanente gaseoso periférico. Esto hace que el cumplimiento del límite incompresible de **7.5 s** sea una tarea dócil para el hardware de catálogo.

Una vez el gas es pre-comprimido por los sopladores, debe separarse. La mezcla es inyectada hacia las membranas de **Pd-Ag** estabilizadas a **400 °C**. Estas membranas no actúan como tamices físicos por tamaño, sino como filtros de solubilidad química. El Paladio disocia catalíticamente las moléculas diatómicas de Deuterio y Tritio; los iones se disuelven en la red cristalina metálica, permean a través de ella y se recombinan en la cara de baja presión. Por el contrario, el Helio-4, al ser un gas noble químicamente inerte, carece de la afinidad necesaria para disociarse y disolverse en el metal. A pesar de su diminuto radio atómico, es rechazado de forma absoluta por la barrera sólida. Para evitar que este Helio acumulado forme una manta estática que asfixie la superficie catalítica (Polarización por Concentración), la celda difusora repudia los diseños en fondo de saco. Emplea un puerto de barrido continuo (*Bleed Port*). Un flujo dinámico barre tangencialmente la cara de alta presión, arrastrando las cenizas de Helio-4 hacia la línea de purga civil y garantizando que el metal precioso esté siempre expuesto a combustible fresco.

El flujo difusivo (J) del isótopo valioso a través del metal se gobierna mediante la Ley de Sieverts:

$$J = \frac{k}{d} \left(\sqrt{P_{up}} - \sqrt{P_{down}} \right)$$

Donde k representa la permeabilidad de la aleación **Pd-Ag**, d es el espesor de la pared metálica, y el diferencial de presión se establece entre el flujo sucio presurizado (P_{up}) y el vacío del colector de combustible puro (P_{down}). El Tritio purificado se deriva directamente hacia las etapas de licuefacción para retroalimentar el cañón de la Fase 1.

§ 5. Integración Doctrinal y Mitigación de Fricciones

5.1. Resolución de Riesgos Sistémicos

El Ecosistema de Respiración interactúa directamente con los vectores críticos de la cinética de gases y la pureza isotópica. El módulo soluciona estos cuellos de botella mediante las siguientes contramedidas:

- **Desafío Técnico (Imposibilidad de Succión Molecular y Cuello de Botella del Helio-4 - Ref. Clúster 3, Vector 2):** Forzar al gas residual a viajar decenas de metros hacia una única tobera de aspiración trasera es imposible. En regímenes de vacío molecular, la fricción viscosa desaparece. Intentar limpiar un tubo de **80 m** aspirando desde la cola condenaría la recarga en **7.5 s**.
- **Contramedida de Diseño:** Repudiamos el bombeo centralizado asumiendo la topología de las doctrinas [SV-3.4] y [SV-3.5]. La pared de la cámara absorbe el Hidrógeno químicamente in situ, mientras el Helio inerte fluye hacia los plenums expansivos donde queda atrapado por fisisorción criogénica a **4 K**. La Fase 9 cierra este proceso ocupándose puramente del volumen local.
- **Desafío Técnico (Contaminación de UHV por Aceites Orgánicos - Ref. Doctrina de Vacío 6.3):** Utilizar turbobombas mecánicas convencionales introduce vapor de hidrocarburos orgánicos en las tuberías. Este aceite retrocede, contamina las tejas cerámicas y envenena la reacción de ignición de forma instantánea inyectando carbono.
- **Contramedida de Diseño:** Implementamos la restricción electromecánica dictada por la norma

[SV-3.5]. La extracción profunda recae enteramente en rotores de levitación magnética (MagLev). Al flotar sobre rodamientos electromagnéticos, las bombas eliminan el uso de cualquier lubricante en la zona primaria.

- **Desafío Técnico (Destrucción Cristalina del Paladio - Ref. Clúster 2, Vector 3):** Las membranas de separación de Paladio son extremadamente frágiles a temperatura ambiente si se exponen a hidrógeno. El metal absorbe el gas, expande su red cristalina y estalla en esquirlas, perdiendo su capacidad selectiva.
- **Contramedida de Diseño:** La refinería aplica el enclavamiento isométrico inherente a la directiva [SV-3.6]. El SCADA prohíbe la presurización de gases hacia la celda difusora hasta certificar que las resistencias térmicas han establecido una isoterma uniforme de **400 °C**. Al operar en caliente, se elude la transición de fase cristalina alfa-beta, erradicando la fragilización.

5.2. Invocación de Soluciones Validadas del Capítulo 6

La arquitectura de la Fase 9 incorpora las siguientes directrices de éxito consolidadas en el manual de ingeniería:

- [SV-3.4] **(Captador Estático de Alta Temperatura Zr-V-Fe):** Uso de la superficie de la pared principal para absorber químicamente la inmensa mayoría del volumen, aliviando la carga de extracción física de las bombas terminales.
- [SV-3.5] **(Vacío Tri-Híbrido y Criotrampas a 4 K):** Configuración de captura física pasiva a temperaturas de espacio profundo para retener el gas inerte Helio-4, operando en sinergia con matrices de turbobombas Roots MagLev estrictamente libres de lubricantes orgánicos.
- [SV-3.6] **(Permeación Continua por Membrana de Paladio):** Empleo de difusores capilares bimetálicos de **Pd-Ag** a **400 °C** para segregar el combustible puro del gas de escape eludiendo el uso de centrifugadoras mecánicas lentas.

5.3. Auditoría de Soluciones Descartadas del Capítulo 6

El diseño del Ecosistema de Respiración descarta de forma categórica los siguientes antipatronos de ingeniería:

- [SD-3.6] **(Criotrampeo por Co-Deposición de Argón):** Se prohíbe inyectar nieblas artificiales de gas Argón sobre los baffles criogénicos con la intención de atrapar el Helio. Cualquier reflujo de este gas inerte pesado hacia el tubo de vuelo dispararía exponencialmente las pérdidas térmicas del núcleo por radiación *Bremsstrahlung*, enfriando el plasma de forma letal.
- [SD-3.7] **(Laberintos de Sombra para Captadores):** Queda prohibido ocultar las aleaciones de captura detrás de obstáculos físicos complejos o sistemas de escamas solapadas. Ocultar los captadores estrangula la conductancia aerodinámica, haciendo matemáticamente imposible alcanzar el nivel prístino de ultra-alto vacío dentro del límite de tiempo asignado.

- **[SD-3.8] (Regeneración UHV en Lote):** Dejamos atrás las pausas operativas globales para descongelar o purgar los equipos de vacío. La regeneración se ejecuta exclusivamente desplazando el trabajo hacia las unidades modulares inactivas durante la rotación diurna/nocturna del arbitraje de carga, manteniendo la entrega comercial ininterrumpida.
-

AUDITORÍA DE COHERENCIA: Análisis de Coherencia y Continuidad entre Fases

Objetivo de la Auditoría: Verificar de forma secuencial y encadenada los ocho puntos de transferencia balística y termodinámica entre los módulos contiguos del túnel del reactor RIF-1. Este análisis audita diámetros, geometría de acoplamiento, continuidad del corsé magnético y dinámica de flujo. Certifica la ausencia de saltos de escala, tapones barométricos o discontinuidades físicas a lo largo de los **185 metros** de eslora de la planta.

§ 1. Transferencia Fase 1 -> Fase 2 (Inyector Off-Axis a Codo de Transición)

- **Geometría y Diámetros:** Transición perfecta. El inyector entrega un cañón recto de **1.20 m** de diámetro interior que encaja sin escalones con el calibre de entrada del codo curvo, también de **1.20 m**. El acoplamiento es rígido mediante brida Todo-Metal de sello doble.
- **Dinámica de Flujo:** El plasma abandona el inyector habiendo alcanzado su velocidad de crucero operativa de **2666 m/s** y una temperatura base de **12 keV**.
- **Acoplamiento Magnético:** El campo magnético se transfiere de forma isomagnética a **7.2 T**. Al ingresar a la curva, la superposición del campo cuadrupolar helicoidal absorbe la inercia del giro sin desestabilizar la separatriz iónica ni provocar deriva centrífuga.

§ 2. Transferencia Fase 2 -> Fase 3 (Difusor Rectilíneo a Antecámara de Ignición)

- **Geometría y Diámetros:** El tramo final de la Fase 2 consiste en un difusor divergente rectilíneo que ensancha el diámetro interior desde los **1.20 m** hasta los **1.70 m**. Esta expansión permite un empalme directo, concéntrico y liso con la boca de la Antecámara de Ignición, la cual sostiene un diámetro constante de **1.70 m**.
- **Dinámica de Flujo:** La velocidad balística se mantiene inalterada a **2666 m/s**. Al expandirse volumétricamente el plasmóide, experimenta un leve enfriamiento adiabático natural que hace caer su temperatura iónica fraccionalmente por debajo de los **12 keV** iniciales. Esta “deuda térmica” acondiciona aerodinámicamente el anillo de plasma antes de recibir el remate energético.
- **Acoplamiento Magnético:** La expansión geométrica atenúa de forma natural el flujo magnético. Las bobinas activas de la Fase 2 guían este decaimiento isentrópico en paralelo al metal, fijando el

campo de entrega de forma precisa en **6.0 T**. La Fase 3 recibe el plasma bajo este mismo régimen plano de **6.0 T**, garantizando una transición libre de cizalladuras o turbulencias en las líneas de fuerza.

§ 3. Transferencia Fase 3 -> Fase 4 (Antecámara de Ignición a Cámara de Combustión)

- **Geometría y Diámetros (Absorción de Dilatación):** Ambas fases operan con un calibre interior idéntico de **1.70 m**. El cañón central de la Fase 4 está anclado en su ecuador exacto. Su inmenso crecimiento térmico empuja la embocadura inicial hacia atrás un total de **36 cm**. La unión emplea un acoplamiento telescópico en sombra geométrica. El labio frío de la Fase 3 penetra por el interior de la Fase 4, asimilando estos **36 cm** sin transmitir tensiones mecánicas. Crucialmente, este solape sostiene una holgura anular ininterrumpida; la ausencia de contacto bimetálico en el vacío anula la conducción térmica, impidiendo que el calor del cañón retroceda hacia el estator.
- **Dinámica de Flujo:** Al estar la inserción orientada a favor de la corriente supersónica, el plasma a **2666 m/s** solo experimenta una micro-expansión aerodinámica inofensiva. Elude cualquier escalón frontal de choque. El remate de radiofrecuencia entrega el núcleo ardiendo a **15 keV** con estabilización giroscópica azimutal firme.
- **Acoplamiento Magnético:** Continuidad ininterrumpida. El campo magnético se sostiene llanamente a **6.0 T** entre ambos módulos. La reacción de fusión balística inicia sin turbulencias topológicas.

§ 4. Transferencia Fase 4 -> Fase 5 (Cámara de Combustión a Tobera Convertidora DEC)

- **Geometría y Diámetros (Absorción de Dilatación):** El cañón central de **1.70 m** finaliza su recorrido de **80 m**. Su masiva dilatación longitudinal empuja la boca de salida hacia adelante un total de **36 cm**. Para absorber este crecimiento elástico sin escalones aerodinámicos, la tobera DEC inicia con un collarín cilíndrico de **0.50 m** a **1.70 m** de diámetro, envolviendo exteriormente el labio de la Fase 4 de forma telescópica. Este solape se ejecuta en sombra geométrica y manteniendo una holgura anular estricta sin fricción. Evita la transmisión de los **600 °C** del acero hacia las cerámicas dieléctricas de la tobera. Solo tras superar este collarín de solape cilíndrico paralelo, el diámetro diverge aerodinámicamente a un ángulo constante de **2.48°** hasta alcanzar los **3.00 m** terminales.
- **Dinámica de Flujo:** El plasma abandona la zona caliente conservando su velocidad supersónica de **2666 m/s** e ingresa al embudo divergente. Al expandirse diamagnéticamente contra el cono y transferir su energía acoplada, la entalpía térmica se agota de forma drástica, provocando un desplome adiabático profundo por debajo de los **15 keV** de la ignición a medida que la inercia se transforma en electricidad.
- **Acoplamiento Magnético:** Para proteger la junta mecánica elástica exterior, el campo se mantiene rígidamente estancado a **6.0 T** a lo largo del collarín cilíndrico inicial de **0.50 m**. Exactamente al

arrancar el embudo divergente, el corsé abandona los **6.0 T** y ejecuta una caída forzada inductiva hasta un umbral estricto de **0.75 T** en la boca de salida, obligando al plasma a expandirse radialmente hasta ocupar **1.40 m** de radio útil para maximizar la Ley de Lenz contra la jaula de cobre GlidCop.

§ 5. Transferencia Fase 5 -> Fase 6 (Tobera Convertidora a Chicane Cortafuegos)

- **Geometría y Diámetros:** La tobera entrega un conducto masivo de **3.00 m** de diámetro interior. El codo de la Fase 6 lo recibe manteniendo exactamente ese mismo calibre constante de **3.00 m**. Esta amplitud geométrica facilita el tránsito holgado, expansivo y simultáneo del flujo iónico remanente junto con la metralla atómica neutra generada.
- **Dinámica de Flujo:** El freno inductivo de la jaula ha extraído el 60% de la energía cinética del haz. La velocidad del flujo se transfiere abatida a **1686 m/s** y bajo un régimen térmico residual frío. Al ingresar a la curva de **25 m** de radio, el flujo iónico obedece al magnetismo y gira suavemente desviándose **3.50 m** de forma lateral. Por el contrario, la metralla neutra ignora los imanes, vuela en línea recta y se estrella de forma inofensiva contra las placas Chevron de Tungsteno del sumidero estático, diluyendo su calor efectivo gracias a la inclinación de las cuñas a **15°**.
- **Acoplamiento Magnético:** El umbral perimetral rebajado a **0.75 T** se empalma de forma isomagnética en la embocadura de la curva, atenuándose suavemente hasta los **0.50 T** en la salida. El devanado cuadrupolar helicoidal resistivo superpuesto retuerce las líneas de fuerza, cortocircuitando pasivamente la separación de cargas polares y anulando la deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ antes de entregar el haz purificado.

§ 6. Transferencia Fase 6 -> Fase 7 (Chicane Cortafuegos a Tubo de Deriva)

- **Geometría y Diámetros:** El flujo iónico purificado (libre de escombros neutros pesados) abandona el codo y accede al eje rectilíneo del tubo de deriva. La sección interior mantiene el diámetro masivo y constante de **3.00 m**. La unión se ejecuta mediante un acoplamiento flexible Slide-On aislado acústicamente mediante fuelles corrugados de Inconel 625 y suspendido sobre cunas con resortes monolíticos de **Inconel 718**.
- **Dinámica de Flujo (El "Milímetro Cero"):** La velocidad balística residual se sostiene estable a **1686 m/s** portando su baja temperatura residual. Exactamente en la línea de transición geométrica, una matriz anular inyecta una cortina supersónica de Helio gas frío mediante toberas convergentes-divergentes orientadas rígidamente a **45° hacia adelante**. Este vector direccional crea un bloqueo aerodinámico que impide al gas retroceder hacia la tobera electromagnética. Los iones capturan electrones libres en microsegundos mediante recombinación volumétrica, ejecutando el desprendimiento magnético (*Plasma Detachment*) seguro antes de que las líneas de campo diverjan al infinito. El plasma pierde su memoria magnética y transiciona hacia un gas neutro tibio y dócil aerodinámicamente.

- **Acoplamiento Magnético:** Caída definitiva a **0 T** absolutos. Al volverse eléctricamente neutro, el fluido se desvincula por completo de las leyes de Lorentz y se expande de forma puramente volumétrica llenando los **106 m³** libres de la galería. El entorno desmagnetizado actúa como un escudo de distancia paramagnética que blindo la mecatrónica de vacío terminal (Fase 9) frente a transitorios o corrientes parásitas inducidas.

§ 7. Transferencia Fase 7 -> Fase 8 (Tubo de Deriva a Plenum Terminal)

- **Geometría y Diámetros:** El gas neutro frío y expandido abandona el tubo y empalma rígidamente con el tanque estático de la Fase 8. La recámara conserva el diámetro interior de **3.00 m** y despliega una longitud abovedada de apenas **5 m**.
- **Dinámica de Flujo:** El fluido ha disipado su colosal inercia direccional por expansión libre y turbulencia viscosa a lo largo de los **15 m** previos. La masa ya no se comporta como un proyectil, sino que cruza la frontera en forma de un frente de onda de choque atenuado y subsónico. Impacta contra el domo elipsoidal de la bóveda, estancando su flujo a **0 m/s**. Este volumen estabiliza el latido absorbiendo la presión dinámica máxima y asentándola en un empuje estático de **0.62 bar**, anulando cualquier rebote sónico destructivo hacia el túnel balístico.
- **Acoplamiento Magnético:** El entorno se transfiere y sostiene matemáticamente en un régimen paramagnético absoluto a **0 T**. Al operar bajo presión dinámica de estancamiento (**0.62 bar**), el módulo carece de resistencia dieléctrica. Por ello, delega toda la contención y el control eléctrico a las fases de ultra-alto vacío ubicadas aguas arriba, confirmándose como una bóveda puramente termodinámica y ciega al electromagnetismo.

§ 8. Transferencia Fase 8 -> Fase 9 (Plenum Terminal a Ecosistema de Respiración)

- **Geometría y Diámetros:** El gas acumulado se enruta hacia las galerías laterales perimetrales, acopladas directamente a las bridas Todo-Metal de los módulos extractores en la cota cero de la nave.
- **Dinámica de Flujo y Respiración:** La presión de estancamiento asciende transitoriamente a **10⁻³ Torr**. Este es el punto de inflexión barométrica. La Ecuación de Evacuación impone un ciclo de recarga incompresible de **7.5 segundos**. En esta ventana estricta de tiempo, la planta procesa todo el volumen.
- **Sinergia Extractiva:** El sistema repudia el bombeo estático en el núcleo. La evacuación se apoya en el **Transporte Balístico de Masa**. El plasma acarrea todo el inventario de gas y lo deposita íntegramente en las recámaras terminales. La succión recae sobre los paneles químicos (NEG) instalados en estas zonas frías extramuros; operando a **200 °C**, la superficie de **50 m²** devora el Hidrógeno a una tasa pasiva de **1,000,000 L/s**. Las turbobombas MagLev y los paneles de criosorción a **4 K** de la Fase 9 cubren la cuota restante. Secuestran el Helio-4 inerte residual y enrutan el Tritio recuperado hacia las membranas capilares de Paladio-Plata a **400 °C** (provistas de barrido tangencial

anti-polarización). Tras la difusión catalítica, el combustible puro al 99.99% se licúa y reinyecta a la Fase 1, cerrando el ciclo con el reactor restaurado a su prístina línea base.