

Aplicabilidad de la Refrigeración Termoelectrónica Optimizada para Transitorios en el Módulo de Potencia Pulsada del "Pistón Atómico" de la Unidad de Potencia Inteligente (IPU)

Sección 1: Introducción y Formulación del Problema

Esta sección establece el contexto de la Unidad de Potencia Inteligente (IPU), define las características operativas únicas del "Pistón Atómico" y enmarca el problema de la gestión térmica como un cuello de botella crítico para el rendimiento y la fiabilidad. Introduce la refrigeración Peltier no como un simple reemplazo de los métodos convencionales, sino como una tecnología con propiedades transitorias únicas que pueden ser especialmente adecuadas para el problema en cuestión.

1.1. La Unidad de Potencia Inteligente (IPU) y el Concepto de "Pistón Atómico"

La Unidad de Potencia Inteligente (IPU) es un sistema avanzado de gestión de energía diseñado para aplicaciones fotovoltaicas, cuyo objetivo principal es resolver el desafío fundamental de la intermitencia de la energía solar.¹ El núcleo de su innovación es un concepto denominado "Pistón Atómico", un módulo diseñado para almacenar energía de manera altamente eficiente y liberarla en "ráfagas instantáneas y potentes" cuando sea necesario.¹

El principio operativo del "Pistón Atómico" se basa en la combinación sinérgica de dos fenómenos eléctricos fundamentales. Primero, la descarga rápida de un capacitor (o, más probablemente, un supercapacitor), que almacena energía en un campo eléctrico y la libera de forma abrupta para proporcionar un pulso de potencia masivo e instantáneo. Segundo, el "retroceso inductivo" (inductive kickback), donde un inductor, al oponerse a un cambio brusco de corriente, genera un pico de voltaje extremo que multiplica la potencia del pulso.¹

La arquitectura del sistema IPU integra un conjunto fotovoltaico como fuente primaria, una

batería principal de Fosfato de Hierro y Litio (LiFePO_4) para el almacenamiento de energía a largo plazo, y un "Módulo de Potencia Pulsada" dedicado, compuesto por un supercapacitor y un inductor, que materializa el concepto del "Pistón Atómico". Todo el sistema está orquestado por una unidad de control central basada en un microcontrolador.¹

1.2. El Desafío Crítico: Gestión de Cargas Térmicas Transitorias de Alto Flujo

El principal desafío operativo de la IPU, identificado explícitamente en su documentación de diseño, es la "Gestión Térmica".¹ La conmutación de alta potencia y los ciclos rápidos inherentes al funcionamiento del "Pistón Atómico" generan una cantidad significativa de calor. Esta carga térmica se ha señalado como el factor limitante clave tanto para la vida útil de los componentes como para la eficiencia general del sistema.¹

La naturaleza de este desafío no es la de una carga térmica constante y predecible. Por el contrario, está caracterizada por pulsos de calor intensos y transitorios que se generan durante los eventos de liberación de energía de muy corta duración y alta potencia. Esta condición exige la implementación de "soluciones de refrigeración avanzadas" que puedan responder eficazmente a estos picos de calor de alto flujo.¹

1.3. Tesis: Una Investigación sobre la Refrigeración Activa Basada en Peltier como Solución Viable

Este informe investiga la aplicabilidad de los Refrigeradores Termoeléctricos (Thermoelectric Coolers, TEC), comúnmente conocidos como dispositivos Peltier, para la gestión de la carga térmica del "Pistón Atómico".

La hipótesis central de este análisis es que, si bien la sabiduría convencional sugiere que los TEC son ineficientes para aplicaciones de refrigeración de alta potencia continua ², su exclusivo efecto transitorio de "superenfriamiento" (supercooling) podría ofrecer una solución sinérgica y excepcionalmente adecuada para la generación de calor pulsado del "Pistón Atómico". Este efecto de superenfriamiento es la capacidad de un TEC para alcanzar temperaturas instantáneas en su lado frío, significativamente más bajas que las alcanzables en estado estacionario, cuando se le somete a un pulso de corriente de alta magnitud.⁴ Por lo tanto, esta investigación explorará la viabilidad de un sistema de refrigeración híbrido optimizado para la respuesta transitoria.

Sección 2: Análisis del Perfil Térmico del "Pistón Atómico"

Esta sección deconstruye la carga térmica del "Pistón Atómico", identificando los componentes específicos que generan calor y cuantificando la magnitud y naturaleza de esta generación de calor. Este análisis es crucial para definir los requisitos de cualquier solución de refrigeración propuesta.

2.1. Identificación de las Fuentes de Calor Primarias

Las principales fuentes de generación de calor dentro del Módulo de Potencia Pulsada son los componentes de conmutación de estado sólido.

- **Semiconductores de Potencia:** Los componentes centrales de generación de calor son los interruptores de potencia, como los MOSFET o IGBT, que se encuentran dentro del "Módulo de Potencia Pulsada".¹ La documentación de diseño establece explícitamente que "la conmutación de alta potencia genera calor".¹ Estos interruptores son los "músculos" de la IPU, encargados de manejar los flujos masivos de energía durante los ciclos de carga y descarga pulsada.¹
- **Componentes Pasivos:** Aunque en menor medida, el inductor y el supercapacitor también contribuyen a la carga térmica. Ambos componentes poseen una resistencia serie equivalente (ESR) no nula, lo que resulta en pérdidas por efecto Joule (I^2R) que se manifiestan como calor, especialmente bajo las altas corrientes pulsadas que caracterizan la operación del "Pistón Atómico".⁷

2.2. Caracterización de la Carga Térmica: Disipación Pulsada vs. Continua

La generación de calor está intrínsecamente ligada a la función principal de la IPU de entregar "ráfagas instantáneas y potentes".¹ Esto da como resultado un perfil de carga térmica altamente transitorio, caracterizado por picos intensos de disipación de calor que están sincronizados con los pulsos de potencia, seguidos de periodos de generación de calor mucho más bajos.

El calor en los semiconductores se genera a través de dos mecanismos principales:

1. **Pérdidas de Conmutación:** Ocurren durante las transiciones de los estados de encendido (ON) a apagado (OFF) y viceversa. Estas pérdidas son proporcionales a la frecuencia de conmutación.⁸ Dada la necesidad de la IPU de generar pulsos "rápidos" e "instantáneos", se infiere el uso de altas frecuencias de conmutación, lo que hace que estas pérdidas sean una contribución significativa a la carga térmica total.
2. **Pérdidas de Conducción:** Se producen cuando el dispositivo está en el estado de pleno encendido (ON) y se calculan como $I^2 \cdot R_{ds(on)}$, donde I es la corriente y $R_{ds(on)}$ es la resistencia en estado de encendido. Dado que la operación implica "altas

corrientes" ¹, estas pérdidas también serán sustanciales durante la duración del pulso.

2.3. Estimación Cuantitativa de la Carga Térmica (Qc) y las Pérdidas de Potencia del Sistema

Aunque la potencia exacta de la IPU no se especifica, se puede utilizar un sistema análogo detallado en la documentación para realizar una estimación cuantitativa. El documento ¹ describe un sistema de almacenamiento híbrido de 35 kW que utiliza convertidores CC-CC con IGBTs (modelo SKM300GB125D) conmutando a 10 kHz, una arquitectura comparable a la del Módulo de Potencia Pulsada.

Para este sistema de 35 kW, las pérdidas de potencia totales calculadas en los semiconductores oscilan entre **551 W** en condiciones nominales y **733 W** bajo sobrecarga.¹ Este rango proporciona una base cuantitativa crítica para la carga térmica (Qc) que un sistema de refrigeración para el "Pistón Atómico" debe ser capaz de gestionar. Este análisis permite pasar de una descripción cualitativa del problema ("se calienta") a una formulación cuantitativa. Una carga térmica de aproximadamente 600-700 W es sustancial y exige una solución de ingeniería robusta, descartando las soluciones de refrigeración puramente pasivas. Cualquier sistema de refrigeración propuesto, incluido uno basado en Peltier, debe ser capaz de disipar este nivel de potencia de manera efectiva, estableciendo así un objetivo de rendimiento claro y medible.

Tabla 1: Perfil Térmico de los Componentes del "Pistón Atómico"

La siguiente tabla consolida el análisis de la carga térmica, sirviendo como la especificación del problema para el diseño del sistema de refrigeración.

Componente	Mecanismo de Generación de Calor	Naturaleza de la Carga	Disipación de Potencia Estimada (W)	Fuentes
Semiconductores de Potencia (MOSFETs/IGBTs de SiC/GaN)	Pérdidas de Conmutación y Conducción	Pulsada, Alto Flujo	550 - 733 (basado en sistema de 35 kW)	¹
Inductor de Potencia Pulsada	Pérdidas I ² R (ESR)	Pulsada	Baja a Moderada (cualitativo)	¹
Supercapacitor	Pérdidas I ² R (ESR)	Pulsada	Baja (cualitativo)	¹
Convertidor CC-CC	Pérdidas de Conmutación y Conducción	Continua/Variable	(Incluido en la estimación de semiconductores)	¹

Sección 3: Rendimiento del Refrigerador Termoelectrico (TEC) en Condiciones Dinámicas

Esta sección constituye el núcleo del argumento técnico. Primero abordará la principal debilidad de los TEC (baja eficiencia) para luego centrarse en sus fortalezas transitorias únicas, argumentando que estas últimas son más relevantes para la aplicación del "Pistón Atómico".

3.1. Limitaciones en Estado Estacionario: El Dilema del Coeficiente de Rendimiento (COP) y el Calor Residual (Qh)

La eficiencia de un TEC se mide por su Coeficiente de Rendimiento (Coefficient of Performance, COP), que se define como el calor bombeado desde el lado frío (Q_c) dividido por la potencia eléctrica consumida por el propio TEC (P_{el}).¹⁰ Los TEC son conocidos por su baja eficiencia en comparación con los sistemas de compresión de vapor convencionales. Los valores típicos de COP para aplicaciones de una sola etapa se sitúan entre 0.3 y 0.7, y pueden ser considerablemente más bajos cuando se enfrentan a grandes diferencias de temperatura (ΔT) entre el lado frío y el caliente.²

Esta baja eficiencia presenta un problema fundamental: el calor residual. El calor total que debe ser disipado por el disipador térmico en el lado caliente (Q_h) es la suma del calor extraído del componente (Q_c) y la potencia eléctrica consumida por el TEC (P_{el}), es decir, $Q_h = Q_c + P_{el}$.¹⁰

Este principio convierte al TEC en un "multiplicador de calor". Por ejemplo, si un TEC con un COP de 0.5 necesita bombear 100 W de calor de un componente ($Q_c = 100$ W), consumirá 200 W de potencia eléctrica ($P_{el} = Q_c / \text{COP} = 100 / 0.5 = 200$ W). En consecuencia, el disipador de calor en el lado caliente debe ser capaz de disipar un total de $Q_h = 100$ W + 200 W = 300 W. El propio sistema de refrigeración añade 200 W de calor al problema. Para una aplicación de estado estacionario, utilizar un TEC para enfriar una fuente de calor de 700 W requeriría un disipador masivo capaz de evacuar más de 2 kW, lo que lo hace una solución impráctica y descarta un enfoque de refrigeración Peltier simple y continuo para la IPU.

3.2. Respuesta Térmica Transitoria: La Física del Superenfriamiento y el Sobrecalentamiento

A pesar de sus limitaciones en estado estacionario, el comportamiento dinámico de los TEC revela una capacidad única. Cuando un TEC es sometido a un pulso de corriente de gran magnitud (varias veces su corriente óptima de estado estacionario, I_{max}), puede alcanzar una

temperatura instantánea en su lado frío significativamente más baja que la que es posible en una operación continua.⁴ Este fenómeno se conoce como "superenfriamiento transitorio". El mecanismo físico subyacente se debe a las diferentes constantes de tiempo de los dos efectos térmicos principales que compiten dentro de un TEC ¹⁴:

1. **Enfriamiento Peltier:** Es un efecto de superficie que ocurre de manera instantánea en la unión de los semiconductores.
2. **Calentamiento por Efecto Joule (I²R):** Es un efecto volumétrico que se genera en todo el cuerpo de los pellets semiconductores y requiere un tiempo finito para difundirse hasta la unión.

Este desfase temporal crea una "carrera contra el calor". Un pulso de corriente genera un enfriamiento Peltier inmediato en la unión. El calor Joule correspondiente se genera simultáneamente en todo el volumen, pero tarda en llegar a la unión. Durante un breve lapso, el efecto de enfriamiento domina, resultando en un "pico de frío" o superenfriamiento.¹³ Inevitablemente, este superenfriamiento es seguido por una fase de "sobrecalentamiento", donde la llegada retardada del gran pulso de calor Joule supera el efecto Peltier, provocando que la temperatura de la unión aumente por encima de su nivel inicial de estado estacionario.¹⁴

3.3. Optimización para una Refrigeración Neta: El Papel de la Forma y Duración del Pulso de Corriente

La clave para una aplicación práctica de este fenómeno reside en lograr una "ventaja transitoria neta", donde el beneficio de enfriamiento obtenido durante la fase de superenfriamiento supere la penalización del sobrecalentamiento posterior.¹⁴

La investigación ha demostrado que la forma y la duración del pulso de corriente son parámetros de control críticos. Se ha observado que los pulsos con forma de triángulo isósceles son más eficaces que las simples ondas cuadradas para maximizar esta ventaja neta.¹⁴ El objetivo es aplicar el pulso de corriente durante el tiempo justo para alcanzar el máximo enfriamiento y luego interrumpirlo o reducirlo drásticamente antes de que la mayor parte del calor Joule llegue a la unión.¹³

Esta característica dinámica de los TEC se alinea perfectamente con el perfil de carga térmica del "Pistón Atómico". La IPU genera un pulso de calor de alto flujo y corta duración. Un TEC puede ser controlado para generar un pulso de *refrigeración* de alta intensidad y corta duración. Al sincronizar estos dos eventos —disparando un pulso de alta corriente al TEC justo antes o en el momento en que el "Pistón Atómico" se activa— el efecto de superenfriamiento puede utilizarse para absorber de forma preventiva el pico de calor de los semiconductores de potencia. Inmediatamente después, el TEC se apagará o se reducirá a un estado de baja potencia, permitiendo que el disipador de calor convencional disipe el calor total acumulado (Qh) durante un período de tiempo más largo.

Este enfoque transforma el problema de uno de ineficiencia en estado estacionario a uno de refrigeración transitoria, bajo demanda y de alta potencia. El TEC no se utiliza para enfriar

continuamente el componente, sino para actuar como un "amortiguador térmico" para los pulsos de calor, lo que representa una aplicación fundamentalmente diferente y más viable de la tecnología.

Sección 4: Una Arquitectura de Gestión Térmica Híbrida Propuesta

Esta sección traduce los conocimientos teóricos de la Sección 3 en un diseño de sistema concreto de alto nivel. Detallará los componentes, su integración y la estrategia de control crítica necesaria para su funcionamiento.

4.1. Topología del Sistema: Integración de Refrigeración Localizada Peltier con Disipación Convectiva

La solución propuesta no es un refrigerador Peltier completo, sino un sistema híbrido que combina lo mejor de dos tecnologías.¹⁷ Este sistema consta de:

1. **Refrigeración Localizada Directa (Spot Cooling):** Módulos TEC de alta potencia (¹⁹) montados directamente sobre los semiconductores de potencia (por ejemplo, MOSFETs de SiC) que son la principal fuente de calor en el "Pistón Atómico".²⁰
2. **Disipación de Calor Primaria:** Un disipador de calor de alto rendimiento y convección forzada (por ejemplo, el SEMIKRON P16/300 con ventilador SKF16B-230-01, como se referencia en ¹), al cual se acopla el lado caliente de los TECs. Este disipador es el responsable de evacuar la carga térmica *total* (Q_h) al ambiente.

La implementación de esta arquitectura requiere una atención meticulosa a la interfaz mecánica y térmica. Es fundamental utilizar material de interfaz térmica (Thermal Interface Material, TIM) de alta conductividad tanto entre el semiconductor y el TEC como entre el TEC y el disipador de calor para minimizar la resistencia térmica y maximizar la transferencia de calor.²⁴ Además, el ensamblaje debe ser mecánicamente robusto para soportar vibraciones sin inducir esfuerzos de cizalladura en los módulos TEC, que son mecánicamente frágiles en esa dirección.²⁶

4.2. Selección y Reducción de Carga (Derating) de Componentes

La selección de componentes es crucial para el éxito del sistema híbrido.

- **Semiconductores de Potencia (SiC/GaN):** El uso de semiconductores de banda ancha (Wide-Bandgap, WBG) como el Carburo de Silicio (SiC) y el Nitruro de Galio

(GaN) es altamente sinérgico. Estos dispositivos son intrínsecamente más eficientes, operan a temperaturas más altas y generan menos calor residual que los IGBT de silicio tradicionales. Esto reduce la carga térmica inicial (Q_c) que el TEC debe bombear, facilitando todo el problema de gestión térmica.²⁷ La propia documentación de la IPU ya sugiere el uso de SiC/GaN como una oportunidad de mejora futura.¹

- **Módulos TEC:** Se requieren módulos de alta potencia con un Q_{max} superior a 100 W.¹⁹ Dada la criticidad de la aplicación, se deben seleccionar módulos diseñados específicamente para ciclos térmicos y operación a alta temperatura, de fabricantes reconocidos como Ferrotec, Laird o II-VI Marlow.²⁶
- **Derating de Componentes:** Para garantizar la fiabilidad a largo plazo bajo las estresantes condiciones de operación pulsada, todos los componentes críticos (semiconductores, capacitores, TECs) deben ser operados por debajo de sus valores nominales máximos. Este proceso, conocido como "derating", implica aplicar márgenes de seguridad a los voltajes, corrientes y temperaturas de operación, siguiendo directrices establecidas como MIL-HDBK-338 o SD-18.³³

4.3. Estrategia de Control Avanzada: Un Bucle de Control Digital para Maximizar la Ventaja Transitoria Neta

Un simple controlador analógico o un control on/off es insuficiente para esta aplicación. Se requiere un sistema de control digital en tiempo real de alta velocidad. El candidato ideal para esta tarea no es un microcontrolador de propósito general como el ESP32 (¹), sino un Procesador de Señal Digital (DSP) dedicado, como la serie

C2000 de Texas Instruments, que está explícitamente diseñada para el control en tiempo real de la electrónica de potencia.¹ Los FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays) representan otra alternativa potente debido a su paralelismo real y su temporización determinista, que son ideales para bucles de control de alta velocidad.³⁸

La arquitectura del bucle de control funcionaría de la siguiente manera:

1. El controlador principal de la IPU (por ejemplo, un ESP32) anticipa un pulso de potencia inminente y envía una señal de disparo al DSP térmico dedicado.
2. El DSP ejecuta un perfil de pulso de corriente pre-programado y optimizado, que se envía al controlador de puerta (gate driver) del TEC. Este pulso está temporizado con precisión para coincidir con el pulso de calor generado por el "Pistón Atómico".
3. Este es un elemento de control predictivo o *feedforward*, ya que utiliza el conocimiento del estado futuro del sistema (el disparo del pistón) para actuar de forma proactiva.
4. Se puede añadir un bucle de retroalimentación (*feedback*) utilizando sensores de temperatura de alta velocidad en la matriz del semiconductor. Estos datos en tiempo real permitirían al DSP ajustar los parámetros del pulso (amplitud, duración) para los ciclos posteriores, optimizando el rendimiento. Incluso se podrían emplear algoritmos de aprendizaje automático (TinyML) en el propio dispositivo para una optimización

adaptativa continua.⁴¹

La arquitectura del firmware debe ser modular y extremadamente robusta. Mientras que un Sistema Operativo de Tiempo Real (RTOS) como FreeRTOS podría gestionar tareas de menor prioridad (como la telemetría o la comunicación), el bucle de control de alta velocidad para la sincronización del pulso del TEC debe implementarse como una rutina de interrupción *bare-metal* (sin sistema operativo). Esto es esencial para garantizar la latencia más baja posible y un jitter mínimo, factores críticos para la temporización precisa del efecto de superenfriamiento.⁴³

El sistema de control es, por tanto, un componente tan crítico como el hardware térmico. La viabilidad de esta solución depende de la capacidad de explotar un efecto transitorio que dura milisegundos o incluso menos. Sin un sistema de control capaz de una precisión y sincronización a nivel de microsegundos, el efecto de superenfriamiento no podría activarse de forma fiable en el momento exacto del pulso de calor. El sistema volvería a su ineficiente comportamiento de estado estacionario, o peor aún, la fase de sobrecalentamiento podría coincidir con el pulso de calor, exacerbando el problema. En consecuencia, el esfuerzo de desarrollo y el coste del sistema de control (DSP, sensores de alta velocidad, firmware complejo) deben considerarse un componente primario de la solución global, no una consideración secundaria.

Sección 5: Análisis Integral de Aplicabilidad

Esta sección proporciona un análisis equilibrado, sopesando las ventajas únicas del sistema híbrido propuesto frente a sus importantes inconvenientes en términos de eficiencia, complejidad y coste, concluyendo con una evaluación formal de la fiabilidad.

5.1. Ventajas Clave en el Contexto de la IPU

El sistema híbrido propuesto ofrece varias ventajas significativas que se alinean bien con los requisitos del "Pistón Atómico":

- **Refrigeración Localizada de Precisión:** Los TEC permiten aplicar refrigeración de alta intensidad directamente en los puntos calientes (hotspots), es decir, en las matrices de los semiconductores de potencia. Este enfoque de "spot cooling" es intrínsecamente más eficiente que intentar enfriar todo el ensamblaje del módulo.²⁰
- **Tiempo de Respuesta Rápido:** El efecto de superenfriamiento es casi instantáneo, lo que permite que la respuesta de refrigeración coincida con la rápida aparición de la carga térmica pulsada del "Pistón Atómico". Esta es una ventaja fundamental sobre los sistemas de refrigeración convencionales (disipadores, refrigeración líquida), que tienen una inercia térmica mucho mayor.⁴
- **Fiabilidad de Estado Sólido:** Al no tener partes móviles, los TEC exhiben un Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) muy alto, que a menudo supera las 100,000 o 200,000

horas.² Esto es un beneficio importante para un sistema diseñado para una operación a largo plazo y con bajo mantenimiento.

- **Reversibilidad:** El mismo dispositivo puede utilizarse para calentar simplemente invirtiendo la polaridad de la corriente.⁴⁷ Aunque es una función secundaria para esta aplicación, podría emplearse para mantener una temperatura mínima de funcionamiento para la electrónica en entornos extremadamente fríos, garantizando el rendimiento de arranque.

5.2. Desventajas Significativas y Estrategias de Mitigación

A pesar de sus ventajas, la solución propuesta presenta importantes desafíos que deben ser abordados.

- **Baja Eficiencia del Sistema y Alto Consumo de Energía:** Esta es la principal desventaja. El propio TEC consume una cantidad considerable de energía, que debe ser suministrada por las reservas de la IPU, reduciendo así la eficiencia de ida y vuelta (round-trip) del sistema global.
 - **Estrategia de Mitigación:** La estrategia clave es utilizar los TEC exclusivamente para la gestión de pulsos transitorios, no para una refrigeración continua. Además, el empleo de semiconductores WBG de alta eficiencia (SiC/GaN) para reducir la carga de calor inicial (Q_c) es fundamental para hacer el problema más manejable.²⁹
- **Complejidad del Sistema:** El sistema híbrido propuesto es significativamente más complejo que un simple disipador de calor. Requiere un sofisticado sistema de control basado en DSP, múltiples fuentes de alimentación (para la IPU y para los TECs) y un firmware complejo para la sincronización y el control de pulsos.¹⁷
 - **Estrategia de Mitigación:** Adoptar un diseño de firmware modular ⁴⁹ y aprovechar las bibliotecas de control digital existentes (por ejemplo, las que ofrece Texas Instruments para su serie C2000 ⁵⁰) puede acelerar el desarrollo y reducir la complejidad del software.
- **Coste:** La lista de materiales (Bill of Materials, BOM) para este sistema será elevada. Los módulos TEC de alta potencia ¹⁹, los DSPs o FPGAs de alto rendimiento ³⁶, los controladores de puerta especializados ⁵² y las complejas PCBs multicapa necesarias para la electrónica de potencia ⁵³ son componentes de alto coste.
 - **Estrategia de Mitigación:** Es imprescindible un análisis exhaustivo de coste-beneficio. El aumento del coste debe justificarse por una mejora demostrable en el rendimiento (mayor potencia de pulso, mayor frecuencia de repetición) o en la fiabilidad (mayor vida útil de los componentes) que no pueda lograrse con métodos de refrigeración convencionales.

5.3. Diseño para la Fiabilidad (DfR): Un Análisis de Modos y Efectos de

Fallo (FMEA)

Para asegurar la robustez del sistema, es esencial aplicar un enfoque de Diseño para la Fiabilidad (Design for Reliability, DfR), utilizando herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA).⁵⁵ El FMEA es un proceso sistemático para identificar fallos potenciales, sus efectos y las estrategias para mitigarlos.⁵⁷

Tabla 2: FMEA para el Sistema de Refrigeración Híbrido Propuesto

La siguiente tabla resume un FMEA preliminar para los componentes clave del sistema de refrigeración propuesto. El Número de Prioridad de Riesgo (RPN) se calcula como $S \times O \times D$, donde S es la Severidad, O es la probabilidad de Ocurrencia y D es la probabilidad de Detección.

Componente/Subsistema	Modo de Fallo Potencial	Efectos Potenciales del Fallo	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detección (D)	RPN (SOD)	Acciones Recomendadas / Mitigación
Módulo Peltier (TEC)	Degradación (aumento de resistencia)	Reducción del rendimiento de refrigeración, aumento del estrés térmico en el semiconductor.	7	4	5	140	Implementar monitorización de la resistencia AC (Z-metering) para estimar el estado de salud (SOH). ⁶⁰
Módulo Peltier (TEC)	Fallo Catastrófico (Corto/Abierto)	Corto: Sobrecarga en la fuente de alimentación del TEC. Abierto: Pérdida total de la refrigeración	9	2	3	54	Implementar protección contra sobrecorriente en el driver del TEC. Implementar monitoriza

		transitoria, posible fallo del semiconductor.					ción de temperatura en tiempo real con umbral de apagado.
DSP de Control Térmico	Cuelgue/Fallo de Firmware	Pérdida de control del TEC. Potencial de sobrecalentamiento descontrolado o falta de refrigeración.	9	3	4	108	Utilizar un temporizador de vigilancia (watchdog timer). Implementar un manejo de errores robusto y una rutina de apagado en estado seguro.
Sensor de Temperatura	Fallo del Sensor (Abierto/Corto/Deriva)	Retroalimentación incorrecta al bucle de control, llevando a una operación inadecuada del TEC.	8	3	6	144	Utilizar sensores redundantes para componentes críticos. Implementar comprobaciones de validez del sensor en el firmware.
Ventilador del Disipador	Fallo Mecánico	Reducción drástica de la disipación de calor	10	4	2	80	Utilizar ventiladores de alta fiabilidad. Implement

		(Qh). El lado caliente del TEC se sobrecalienta, causando fallo del TEC y sobrecalentamiento del semiconductor de potencia.					ar monitorización de la velocidad del ventilador (tacómetro) para detectar fallos y activar un apagado del sistema.
Semiconductor de Potencia (SiC/GaN)	Fallo por Cortocircuito	Fallo catastrófico de la IPU. Potencial riesgo de incendio.	10	2	2	40	Implementar protección rápida contra cortocircuitos (ej. DESAT para IGBTs, circuitos especializados para SiC/GaN) en el gate driver. ⁶¹

Sección 6: Conclusión y Recomendaciones Estratégicas

Esta sección final sintetiza el análisis completo en un veredicto claro y proporciona recomendaciones concretas y procesables para el equipo de desarrollo de la IPU.

6.1. Evaluación Final sobre la Viabilidad de la Refrigeración Peltier para

el "Pistón Atómico"

Una solución de refrigeración Peltier convencional, operando en estado estacionario, es inequívocamente inviable para esta aplicación debido a su extremadamente bajo COP y el consiguiente calor residual excesivo. Sin embargo, el perfil de calor pulsado único del "Pistón Atómico" se alinea notablemente bien con las capacidades de superenfriamiento transitorio de los TECs.

El veredicto es que un **sistema de refrigeración termoeléctrico híbrido y optimizado para transitorios** es una solución tecnológicamente factible y de alto rendimiento. No obstante, introduce una complejidad y un coste significativos en el sistema. Su adopción se justifica únicamente si las ganancias de rendimiento (por ejemplo, una mayor potencia de pulso, una tasa de repetición más rápida o una mayor vida útil de los componentes) habilitadas por una gestión térmica superior son críticas para la propuesta de valor de la IPU y no pueden lograrse por medios más convencionales.

6.2. Recomendación I: Priorizar una Arquitectura de Refrigeración Híbrida

Se recomienda centrar los esfuerzos de diseño en un sistema que utilice TECs para la refrigeración localizada de alta velocidad de los semiconductores de potencia, acoplados a un robusto disipador de calor convencional (por ejemplo, de aletas y ventilador) para la evacuación de calor a granel. Este enfoque aprovecha las fortalezas de ambas tecnologías, utilizando cada una para la tarea en la que es más eficaz.

6.3. Recomendación II: Enfocarse en el Control Digital Avanzado para la Optimización de Transitorios

El sistema de control es el eje central de esta solución. Es crucial asignar recursos significativos de I+D al desarrollo de un bucle de control predictivo y en tiempo real.

Acción recomendada: Adquirir kits de desarrollo para DSPs de alto rendimiento (por ejemplo, la serie C2000 de TI ³⁶) o FPGAs. Estos dispositivos están mucho mejor preparados para los requisitos de temporización y procesamiento en tiempo real de esta aplicación que un microcontrolador de propósito general como el ESP32.

6.4. Recomendación III: Hoja de Ruta para la Validación mediante Simulación y Prototipado

Se propone un proceso de validación por etapas para mitigar el riesgo técnico:

1. **Paso 1 - Simulación:** Desarrollar un modelo de simulación termoelectrico acoplado (utilizando herramientas como SPICE, Simulink o Ansys). El objetivo es validar teóricamente el efecto de superenfriamiento bajo el perfil de pulso de calor específico del "Pistón Atómico". Esta es una forma de bajo coste para reducir el riesgo del concepto antes de construir hardware.
2. **Paso 2 - Prototipado:** Construir un prototipo de sobremesa de un solo componente. Este prototipo debe consistir en un único semiconductor de potencia (un MOSFET de SiC), un TEC de alta potencia, un disipador de calor y el sistema de control basado en DSP. El objetivo es medir experimentalmente la reducción de temperatura a nivel de la matriz del semiconductor durante un pulso de potencia simulado y validar la "ventaja transitoria neta". La obtención de estos datos empíricos es esencial antes de comprometerse con el diseño de un sistema completo.

Obras citadas

1. Panel_IPU_3.pdf
2. Thermoelectric cooling - Wikipedia, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_cooling
3. Peltier vs. Compressor-Based Cooling | Blog - Laboratory Supply Network, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://labsup.net/blogs/blog/peltier-vs-compressor-based-cooling>
4. Transient cooling of thermoelectric coolers and its applications for microdevices, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/publications/pdf/YangTransientECM05.pdf>
5. Supercooling of Peltier cooler using a current pulse | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://www.researchgate.net/publication/234988213_Supercooling_of_Peltier_cooler_using_a_current_pulse
6. Peltier Supercooling in Transient Thermoelectrics: Spatial Temperature Profile and Characteristic Cooling Length - PMC, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7514707/>
7. Failure Analysis of Capacitors and Inductors - KEMET, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.kemet.com/en/us/technical-resources/failure-analysis-of-capacitors-and-inductors.html>
8. Five Ways SiC MOSFET Technology Differs from IGBTs | Avnet Silica, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://my.avnet.com/silica/solutions/technologies/power/power-technologies/wide-bandgap/five-ways-sic-mosfet-technology-differs-from-igbts/>
9. Loss-Comparison between SiC MOSFET and Si IGBT | Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://toshiba.semicon-storage.com/us/semiconductor/product/mosfets/sic-mosfets/articles/loss-comparison-between-sic-mosfet-and-si-igbt.html>

10. Peltier Element Efficiency - Meerstetter Engineering, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/71-peltier-element-efficiency>
11. All about Peltier Devices - Proteus, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.labcenter.com/blog/sim-peltier-models/>
12. COP of a Thermoelectric Cooler (TEC) - Thermal Book, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://thermalbook.wordpress.com/cop-of-a-thermoelectric-cooler-tec/>
13. The Transient Supercooling Enhancement For A ... - Purdue e-Pubs, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2772&context=iracc>
14. Transient Thermoelectric Pulse Cooling, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://thermoelectricsolutions.com/transient-thermoelectric-pulse-cooling/>
15. The transient behavior of Peltier junctions pulsed with supercooling - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/257972562_The_transient_behavior_of_Peltier_junctions_pulsed_with_supercooling
16. Transient Thermoelectric Supercooling: Isosceles Current Pulses From a Response Surface Perspective and The Performance Effects Of Pulse Cooling a Heat Generating Mass - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/304090998_Transient_Thermoelectric_Supercooling_Isosceles_Current_Pulses_From_a_Response_Surface_Perspective_and_The_Performance_Effects_Of_Pulse_Cooling_a_Heat_Generating_Mass
17. Advanced Power Electronics Cooling Techniques - Number Analytics, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.numberanalytics.com/blog/advanced-power-electronics-cooling-techniques>
18. (PDF) Design and Fabrication of Thermoelectric Air- Cooling System - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/359480239_Design_and_Fabrication_of_Thermoelectric_Air-Cooling_System
19. High Power TECs | Thermoelectric Coolers (TECs) | Products ..., fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://customthermoelectric.com/products/thermoelectric-coolers-tecs/high-power-tecs.html>
20. Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/4238601_Hot_spot_cooling_using_embedded_thermoelectric_coolers
21. Keeping connected electronics cool with thermoelectric modules, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.powerelectronictips.com/keeping-connected-electronics-cool-with-thermoelectric-modules/>
22. P16/300B CMT | Heatsink, SEMIPACK, SEMIPONT, SEMITRANS ..., fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://uk.rs-online.com/web/p/heatsinks/1336335>

23. Semikron fan SKF 16B-230-01 / SEMIRKON / Eltra Trade - YouTube, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=AdrJbbv6PyU>
24. Peltier Application Note - Same Sky, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.sameskydevices.com/catalog/resource/peltier-app-note.pdf>
25. Peltier Cooler Installation - Thermoelectric, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermal-ref06/>
26. Thermoelectric Module Reliability, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermal-ref10/>
27. A deep dive into SiC and GaN power devices: Advances and prospects - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://www.researchgate.net/publication/375449275_A_deep_dive_into_SiC_and_GaN_power_devices_Advances_and_prospects
28. GaN and SiC technology for power conversion systems - Premium PSU, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://premiumpsu.com/resources-news/gan-and-sic-technology-for-power-conversion-systems/>
29. SiC and GaN: Transforming Efficiency in Power Electronics, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.powerelectronicsnews.com/sic-and-gan-transforming-efficiency-in-power-electronics/>
30. The substantial benefits of silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) in power electronics - Avnet, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.avnet.com/americas/resources/article/the-substantial-benefits-of-silicon-carbide-and-gallium-nitride-in-power-electronics/>
31. Peltier Cooling for Machine Vision - Laird Thermal Systems, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://lairdthermal.com/sites/default/files/ckfinder/files/resources/Application-Notes/Peltier-cooling-for-machine-vision/Peltier-Cooling-for-Machine-Vision-Appnote-073021.pdf>
32. Ferrotec Peltier Thermoelectric Cooler Modules and Thermal Solutions, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://thermal.ferrotec.com/>
33. Electrical stress de-rating analysis - NAVSEA, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/PDFs/Resources/ResourcesElectStressDeratingAnalysis.pdf
34. Derating - Quanterion Solutions Incorporated, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.quanterion.com/derating/>
35. The Basics of Derating Electronic Components - Accendo Reliability, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://accendoreliability.com/basics-derating-electronic-components/>
36. C2000 real-time microcontrollers | TI.com - Texas Instruments, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/c2000-real-time-control-mcus/overview.html>

37. Real-Time Control with C2000™ - Mouser Electronics, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.mouser.com/pdfDocs/mouser-ti-realttimecontrol-whitepaper-en.pdf>
38. What is an FPGA? | Uses, Applications & Advantages – Digilent Blog, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://digilent.com/blog/what-is-an-fpga/>
39. The Power of FPGA - QBayLogic, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://qbaylogic.com/fpga/>
40. What are the benefits of using an FPGA instead of a CPU for running software? - Quora, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.quora.com/What-are-the-benefits-of-using-an-FPGA-instead-of-a-CPU-for-running-software>
41. A Self-Powered Sensing System with Embedded TinyML for Anomaly Detection, fecha de acceso: junio 29, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/374172001_A_Self-Powered_Sensing_System_with_Embedded_TinyML_for_Anomaly_Detection
42. ShawnHymel/tinyml-example-anomaly-detection - GitHub, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://github.com/ShawnHymel/tinyml-example-anomaly-detection>
43. RTOS or Bare-Metal: A Technical Comparison for Embedded System Design | ACL Digital, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.acldigital.com/blogs/rtos-vs-bare-metal-embedded-architecture>
44. Bare Metal vs RTOS: Choose the Right Option - Liquid Web, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.liquidweb.com/blog/bare-metal-vs-rtos/>
45. From Bare Metal to RTOS: When Should You Make the Switch? - Embedded, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.embedded.com/from-bare-metal-to-rtos-when-should-you-make-the-switch/>
46. Advantages of Thermoelectric Cooling, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermal-ref04/>
47. Intro to Thermoelectric Cooling, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermal-ref01/>
48. How Thermoelectric Cooling Works [2025], fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-cooling-works/>
49. Mastering Firmware Development - Number Analytics, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-firmware-development-microcontrollers>
50. C2000™ real-time control MCUs: Digital Control Library - Introduction | Video | TI.com, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.ti.com/video/6138407639001>
51. IC, Texas Instruments, DSP, DSC C2000 32-bit MCU with 150 MHz, TMS320F - DEX, fecha de acceso: junio 29, 2025,
<https://store.dex.com/products/ic-dsp-dsc-c2000-32-bit-mcu-with-150-mhz-tms320f2812zaya>

52. TND6237 - SiC MOSFETs: Gate Drive Optimization - Onsemi, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.onsemi.com/pub/collateral/tnd6237-d.pdf>
53. How much does it cost to get a PCB assembled? Ultimate Guide. - AalokTronix, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://aaloktronix.com/how-much-does-it-cost-to-get-a-pcb-assembled-the-ultimate-guide/>
54. PCB Cost Guide: How Much Does a Circuit Board Cost? - PCBasic, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://www.pcbasic.com/blog/pcb_cost.html
55. Optimizing Your PCB Using Design for Reliability (DfR) Principles, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2021-optimizing-your-pcb-using-design-for-reliability-dfr-principles>
56. Designing for Reliability in Power Electronics - Number Analytics, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/design-for-reliability-in-power-electronics>
57. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers, fecha de acceso: junio 29, 2025, [https://www.tceo.ir/file/?260032/Failure-Modes-and-Effects-Analysis-\(FMEA\)-for.pdf](https://www.tceo.ir/file/?260032/Failure-Modes-and-Effects-Analysis-(FMEA)-for.pdf)
58. Failure mode and effects analysis - Wikipedia, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode_and_effects_analysis
59. What is FMEA? Failure Mode & Effects Analysis - ASQ, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://asq.org/quality-resources/fmea>
60. Thermoelectric Coolers Introduction - the Basics, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.tec-microsystems.com/faq/thermoelectric-coolers-intro.html>
61. Comprehensive Analysis of Short circuit Protections for Silicon-Carbide MOSFET - MATEC Web of Conferences, fecha de acceso: junio 29, 2025, https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2023/13/mateconf_menec2023_02007.pdf
62. Review of Short-circuit Protection Circuits for SiC MOSFETs - JSTS - Journal of Semiconductor Technology and Science, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://jsts.org/jsts/XmlViewer/f421366>
63. IGBT & SiC Gate Driver Fundamentals - Texas Instruments, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.ti.com/lit/slyy169>