

# Gestión Térmica Avanzada y Recuperación de Calor Residual para la Unidad de Potencia Inteligente (IPU): Un Análisis de Viabilidad y Diseño de Sistemas de Tubos de Calor y Generadores Termoelectrónicos

**Resumen Ejecutivo:** El presente informe técnico aborda el desafío crítico de la gestión térmica en la Unidad de Potencia Inteligente (IPU), un sistema electrónico de potencia diseñado para la entrega de energía en pulsos de alta intensidad. La operación del módulo "Pistón Atómico" de la IPU, caracterizada por ciclos rápidos y altas corrientes, genera cargas térmicas transitorias significativas, estimadas en un pico de aproximadamente 700-750 W. Esta generación de calor pulsado representa una amenaza fundamental para la fiabilidad y la vida útil de los componentes semiconductores de potencia. Este estudio investiga la viabilidad y el diseño conceptual de soluciones avanzadas de refrigeración y recuperación de energía residual, centrándose específicamente en la disipación de calor del lado caliente de un Módulo Termoelectrónico de Refrigeración (TEC) que se presume se utiliza para la refrigeración de precisión de los componentes críticos.

Se analizan dos tecnologías principales: la transferencia de calor por cambio de fase mediante tubos de calor y cámaras de vapor, y la recuperación de calor residual mediante Generadores Termoelectrónicos (TEG). El análisis demuestra que las cámaras de vapor son una solución superior para la dispersión inicial del alto flujo de calor desde la fuente concentrada (el lado caliente del TEC), proporcionando una superficie isotérmica ideal para la integración de tecnologías de disipación secundarias.

Posteriormente, se evalúa la implementación de una matriz de TEGs sobre la cámara de vapor para convertir una porción del calor residual en energía eléctrica utilizable. El modelado indica que, si bien esta aproximación puede recuperar una cantidad modesta de potencia (estimada en el rango de 5-15 W), introduce una resistencia térmica adicional significativa en la ruta de disipación primaria. Esta resistencia añadida puede comprometer el rendimiento de la refrigeración principal, lo que representa un compromiso fundamental de diseño entre la eficiencia de refrigeración y la recuperación de energía.

Se proponen y comparan dos arquitecturas de sistema: (1) un sistema de máximo rendimiento de refrigeración que utiliza una cámara de vapor acoplada directamente a una solución de refrigeración líquida por microcanales, y (2) un sistema híbrido que integra la cámara de

vapor, la matriz de TEG y un disipador de calor de alto rendimiento con convección forzada. El análisis concluye que la selección de la arquitectura óptima depende de las prioridades de la misión de la IPU. Para una fiabilidad máxima y un rendimiento de refrigeración superior, se recomienda la solución de refrigeración líquida. Para aplicaciones donde la eficiencia energética y la resiliencia del sistema (a través de la energía recuperada) son críticas, el sistema híbrido con TEGs es una alternativa viable, aunque requiere una gestión cuidadosa de los compromisos térmicos y un mayor coste y complejidad del sistema. El informe subraya la necesidad de un modelado térmico transitorio y el desarrollo de algoritmos de control "conscientes de la temperatura" para gestionar de forma segura las fases de arranque en frío y los picos de carga pulsada inherentes a la operación de la IPU.

## **1.0 Introducción y Definición del Problema**

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

La Unidad de Potencia Inteligente (IPU) representa un paradigma avanzado en sistemas de electrónica de potencia, diseñada para la generación y gestión de energía en aplicaciones que requieren una entrega de potencia pulsada y de alta intensidad. El núcleo funcional de la IPU reside en su módulo "Pistón Atómico", un concepto innovador que aborda la intermitencia de fuentes de energía como la solar, almacenando eficientemente la energía para liberarla en ráfagas instantáneas y potentes cuando es necesario.<sup>1</sup>

El mecanismo del "Pistón Atómico" se basa en la combinación sinérgica de dos principios eléctricos fundamentales: la descarga capacitiva y el retroceso inductivo. Primero, un supercondensador almacena energía en un campo eléctrico, que puede liberarse súbitamente para proporcionar un pulso de potencia masivo e instantáneo. Simultáneamente, un inductor se opone a los cambios bruscos de corriente; al interrumpir el flujo de corriente a través de él, se genera un pico de voltaje extremo que multiplica la potencia del pulso.<sup>1</sup> Esta capacidad para generar "ráfagas instantáneas y potentes" es la propuesta de valor central de la IPU, pero también es la fuente de sus desafíos de ingeniería más significativos, particularmente en el dominio de la gestión térmica. La operación intrínseca de la IPU está, por tanto, inseparablemente ligada a la generación de cargas térmicas intensas y transitorias, que deben ser gestionadas para asegurar la viabilidad y fiabilidad del sistema a largo plazo.

### **1.2. Caracterización del Desafío Térmico: Generación de Calor Pulsado**

El principal desafío térmico de la IPU no radica en una carga de calor constante y predecible, sino en la naturaleza de su generación. El calor se produce en pulsos de alta intensidad que

están sincronizados con la operación del "Pistón Atómico".<sup>1</sup> Esta característica es una consecuencia directa de los "ciclos rápidos y las altas corrientes" que son esenciales para la funcionalidad del sistema.<sup>1</sup> La conmutación de alta potencia, necesaria para la manipulación precisa de la energía almacenada en los supercondensadores e inductores, es la principal fuente de estas pérdidas térmicas.<sup>1</sup>

Esta naturaleza pulsada de la carga térmica impone restricciones de diseño únicas en cualquier solución de refrigeración. A diferencia de un sistema con una carga térmica media equivalente, la IPU somete a sus componentes a ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento. Por lo tanto, el sistema de gestión térmica no solo debe ser capaz de disipar la carga de calor promedio a lo largo del tiempo, sino que también debe poseer la capacidad de absorber y transferir picos de energía térmica instantáneos. La masa térmica y, de manera más crítica, la respuesta transitoria del sistema de refrigeración, se convierten en parámetros de diseño tan importantes como su resistencia térmica en estado estacionario. Una gestión térmica inadecuada no solo reduce la eficiencia, sino que degrada activamente los componentes, limitando la vida útil de todo el sistema.<sup>1</sup>

### 1.3. Definición de los Objetivos de la Gestión Térmica

En el contexto del exigente perfil operativo de la IPU, los objetivos para el sistema de gestión térmica (TMS) son multifacéticos y deben abordarse de manera jerárquica para garantizar el éxito del sistema.

El **objetivo primario e ineludible** es la fiabilidad del sistema. Esto se traduce en la necesidad de mantener las temperaturas de unión ( $T_j$ ) de los semiconductores de potencia (por ejemplo, IGBTs o MOSFETs) dentro de sus límites operativos seguros. Los fabricantes de semiconductores suelen especificar una temperatura máxima de unión, a menudo en el rango de 150°C a 175°C.<sup>1</sup> Exceder este límite, incluso de forma transitoria durante los pulsos de potencia, puede provocar una degradación acelerada, una reducción de la vida útil y, en última instancia, un fallo catastrófico del componente y del sistema.<sup>1</sup> Por lo tanto, la función principal del TMS es prevenir que la

$T_j$  alcance estos niveles críticos bajo todas las condiciones operativas, incluidas las sobrecargas.

El **objetivo secundario**, que representa una oportunidad para la optimización del sistema, es la mejora de la eficiencia global. Dado que el calor generado es energía perdida, la recuperación de una parte de este calor residual puede mejorar la eficiencia neta de la IPU. Este objetivo introduce la viabilidad de utilizar Generadores Termoeléctricos (TEGs). En esta configuración, los TEGs no actúan simplemente como parte de la ruta de disipación, sino como dispositivos de recolección de energía, convirtiendo el gradiente de temperatura a través de ellos en energía eléctrica utilizable.

El **objetivo terciario** es proponer una solución de ingeniería que sea robusta, fiable y fabricable. La solución debe ser evaluada no solo por su rendimiento térmico y eléctrico, sino también por su complejidad, coste, peso, volumen y mantenibilidad, asegurando que sea una

opción viable para la integración en el producto final de la IPU.

La interdependencia de estos objetivos es fundamental. Por ejemplo, la implementación de TEGs para la recuperación de energía (objetivo secundario) introduce una resistencia térmica adicional en la ruta de disipación, lo que podría comprometer el objetivo primario de mantener bajas las temperaturas de unión. Por lo tanto, el diseño del TMS no es una tarea de optimización de un solo parámetro, sino un ejercicio de equilibrio de compromisos a nivel de sistema. La estrategia de control de la IPU, que dicta la frecuencia y la magnitud de los pulsos de potencia <sup>1</sup>, no puede diseñarse de forma aislada. Debe ser "consciente térmicamente", capaz de modular la operación del "Pistón Atómico" basándose en la retroalimentación en tiempo real del TMS para garantizar que los límites térmicos nunca se excedan. Esto revela que el TMS no es un subsistema auxiliar, sino una tecnología habilitadora que define el verdadero envoltorio de rendimiento y fiabilidad de la IPU.

## 2.0 Análisis de la Carga Térmica Primaria

### 2.1. Identificación de las Fuentes de Calor

Para diseñar un sistema de gestión térmica eficaz, es imperativo identificar y cuantificar con precisión las fuentes de calor dentro de la IPU. El calor se genera principalmente en los componentes que gestionan los flujos de alta potencia durante los ciclos de carga y descarga del "Pistón Atómico".

Las **fuentes de calor primarias** son los dispositivos semiconductores de estado sólido que realizan la conmutación de alta potencia. Estos componentes, que pueden ser Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBTs) o Transistores de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor (MOSFETs), son los "músculos" que controlan el flujo de energía hacia y desde los elementos de almacenamiento (supercondensadores e inductores).<sup>1</sup> El calor en estos dispositivos se genera a través de dos mecanismos principales:

1. **Pérdidas por Conducción:** Ocurren cuando el transistor está en su estado de pleno encendido (ON) y la corriente fluye a través de él. Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente ( $I^2$ ) y a la resistencia en estado de encendido del dispositivo ( $R_{DS(on)}$  para MOSFETs o  $V_{CE(sat)}$  para IGBTs). Dado que la operación del "Pistón Atómico" implica "altas corrientes", estas pérdidas son una fuente sustancial de calor durante la duración del pulso de potencia.<sup>1</sup>
2. **Pérdidas por Conmutación:** Se producen durante las transiciones entre los estados de encendido (ON) y apagado (OFF) del transistor. Durante estos breves instantes, tanto el voltaje a través del dispositivo como la corriente que fluye a través de él son significativamente distintos de cero, lo que resulta en un pico de disipación de potencia instantánea. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la frecuencia de conmutación. Dado que la IPU se basa en "ciclos rápidos" para generar pulsos

potentes, se infiere una alta frecuencia de conmutación (un sistema análogo opera a 10 kHz <sup>1</sup>), lo que convierte a las pérdidas por conmutación en un contribuyente principal a la carga térmica total.

Las **fuentes de calor secundarias** incluyen los componentes pasivos del módulo. Específicamente, el inductor y el supercondensador, a pesar de su función de almacenamiento de energía, no son ideales y poseen una Resistencia Serie Equivalente (ESR) interna. Cuando las altas corrientes pulsadas de la IPU fluyen a través de estos componentes, la ESR provoca pérdidas por calentamiento Joule ( $I^2R_{ESR}$ ), contribuyendo a la carga térmica general del sistema, aunque en menor medida que los semiconductores activos.<sup>1</sup>

## 2.2. Cuantificación de la Carga Térmica: Análisis de Estado Estacionario y Transitorio

La cuantificación precisa de la carga térmica es el parámetro de diseño más crítico para el sistema de refrigeración. Si bien la IPU es un sistema único, se puede establecer una línea base de ingeniería robusta utilizando los datos detallados proporcionados para un sistema de almacenamiento de energía híbrido análogo de 35 kW, que también utiliza IGBTs para la conmutación de alta potencia.<sup>1</sup>

El análisis térmico para este sistema de referencia, realizado con la herramienta de simulación SEMISELT™, calculó las pérdidas de potencia totales en los semiconductores bajo diversas condiciones operativas. Los resultados clave, que sirven como una estimación conservadora para la IPU, son los siguientes <sup>1</sup>:

- **Pérdidas en Operación Nominal:** Varían entre **551 W** (modo Buck) y **601 W** (modo Boost).
- **Pérdidas en Operación de Sobrecarga (20%):** Aumentan a un rango de **669 W** (modo Buck) a **733 W** (modo Boost).

Basado en este análisis análogo, el diseño del sistema de gestión térmica para la IPU debe considerar una **carga térmica de pico (Qpico) en el rango de 700 W a 750 W**. Este valor representa la cantidad total de calor que debe ser evacuada eficazmente del sistema para mantener las temperaturas operativas seguras.

Sin embargo, es crucial contextualizar esta cifra. Este valor de 733 W representa la disipación de potencia *promedio* durante un ciclo de operación en condiciones de sobrecarga. La naturaleza fundamentalmente pulsada de la IPU <sup>1</sup> implica que la disipación de potencia instantánea durante un pulso de alta corriente será significativamente mayor que este promedio. La unión del semiconductor, con su masa térmica extremadamente pequeña, responderá a estos picos de potencia instantáneos con rápidas excursiones de temperatura. Un sistema de refrigeración diseñado únicamente para disipar una carga

*promedio* de 733 W podría tener una capacidad de disipación en estado estacionario adecuada, pero podría carecer de la respuesta transitoria o la capacidad térmica para absorber la energía del pulso lo suficientemente rápido. Esto podría permitir que la temperatura de la unión supere momentáneamente su límite de seguridad durante cada

pulso, llevando a una degradación acelerada a pesar de que la temperatura *promedio* parezca segura. Por lo tanto, la selección de la tecnología de refrigeración no puede basarse únicamente en su resistencia térmica en estado estacionario ( $R_{th}$  en K/W). La capacidad de la tecnología para gestionar flujos de calor transitorios de alta intensidad es de suma importancia. Esto favorece inherentemente a las tecnologías con tiempos de respuesta térmica muy rápidos, como la refrigeración por cambio de fase (tubos de calor, cámaras de vapor) o la refrigeración líquida directa, sobre los disipadores de calor de gran masa refrigerados por aire, que dependen de una mayor inercia térmica.

### 2.3. Impacto del Estrés Térmico en la Fiabilidad de los Componentes de la IPU

La gestión térmica inadecuada es una de las principales causas de fallo en los sistemas de electrónica de potencia. El calor excesivo no solo reduce la eficiencia operativa al aumentar la resistencia de los componentes, sino que también acelera los mecanismos de degradación de los materiales, limitando drásticamente la vida útil y la fiabilidad del sistema.<sup>1</sup> Para un sistema de alto rendimiento como la IPU, donde la fiabilidad es primordial, comprender y mitigar el estrés térmico es un objetivo de diseño de primer orden.

Para abordar esto sistemáticamente, se debe aplicar un enfoque de **Diseño para la Fiabilidad (DfR)**. DfR es una disciplina de ingeniería que busca garantizar que un producto o sistema cumpla con su función especificada dentro de su entorno operativo durante toda su vida útil esperada.<sup>3</sup> En lugar de probar la fiabilidad en el producto final, DfR integra la fiabilidad en la fase de diseño, identificando y abordando de forma proactiva los posibles modos de fallo antes de que se fabriquen los prototipos.

Un principio fundamental de DfR en la electrónica de potencia es el **derating (reducción de la capacidad nominal) de los componentes**. Esta práctica implica operar intencionadamente los componentes por debajo de sus valores nominales máximos especificados por el fabricante.<sup>7</sup> Por ejemplo, un condensador con una tensión nominal de 50 V podría utilizarse en un circuito donde la tensión máxima sea de 40 V (un derating del 80%). De manera similar, un semiconductor con una temperatura de unión máxima de 150°C debería funcionar a una temperatura significativamente inferior para garantizar un margen de seguridad.

La justificación de esta práctica se basa en la física del fallo. La tasa de fallo de los componentes electrónicos aumenta exponencialmente con el estrés, especialmente el térmico. La **ecuación de Arrhenius** se utiliza comúnmente para modelar esta relación, con una regla general que indica que la tasa de fallo de un componente se duplica por cada aumento de 10°C en la temperatura de funcionamiento.<sup>8</sup> Por lo tanto, una refrigeración eficaz que reduzca la temperatura de funcionamiento de los semiconductores de la IPU de, por ejemplo, 120°C a 100°C, podría teóricamente cuadruplicar su vida útil.

Para la IPU, el estrés térmico también puede inducir fallos mecánicos. Los ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento (estrés termomecánico) provocan la expansión y contracción

diferencial de los distintos materiales del encapsulado del semiconductor (silicio, cobre, soldadura, cerámica), lo que puede provocar la fatiga de las uniones de soldadura, la delaminación de las capas o la rotura de los hilos de conexión (bond wires), todos ellos modos de fallo conocidos en los convertidores de alta potencia.<sup>3</sup> Por lo tanto, el TMS no solo debe mantener la temperatura máxima por debajo de un umbral, sino también minimizar la amplitud de las oscilaciones de temperatura ( $\Delta T_j$ ) durante los ciclos de pulsos para mejorar la fiabilidad termomecánica.

## 3.0 Transferencia de Calor de Alta Eficiencia mediante Dispositivos de Cambio de Fase

Para transportar eficazmente la carga térmica concentrada y pulsada desde el lado caliente del módulo TEC a una zona de disipación más grande, se requiere una solución con una conductividad térmica efectiva muy superior a la de los conductores sólidos como el cobre o el aluminio. Los dispositivos de transferencia de calor por cambio de fase, como los tubos de calor (heat pipes) y las cámaras de vapor (vapor chambers), son tecnologías pasivas que cumplen este requisito.

### 3.1. Fundamentos de la Operación de Tubos de Calor y Cámaras de Vapor

Tanto los tubos de calor como las cámaras de vapor operan según el mismo principio termodinámico de transferencia de calor bifásica, un ciclo cerrado y pasivo que aprovecha el calor latente de vaporización de un fluido de trabajo.<sup>13</sup> El proceso se puede descomponer en cuatro etapas fundamentales:

1. **Evaporación:** El dispositivo se coloca en contacto térmico con la fuente de calor (en este caso, el lado caliente del TEC). El calor se transfiere a través de la carcasa del dispositivo (el "evaporador") a una estructura de mecha interna saturada con un fluido de trabajo, como agua pura desionizada. Al absorber esta energía térmica, el fluido se vaporiza a una temperatura relativamente baja debido a la baja presión interna (vacío parcial) del dispositivo sellado.<sup>13</sup> Este proceso absorbe una gran cantidad de energía en forma de calor latente de vaporización.
2. **Transporte de Vapor:** La vaporización del fluido en el extremo caliente crea un ligero aumento de la presión local. Este gradiente de presión entre el extremo caliente (evaporador) y el extremo frío (condensador) impulsa el vapor a alta velocidad a través del núcleo hueco del dispositivo, transportando eficazmente la energía térmica latente.<sup>13</sup>
3. **Condensación:** Cuando el vapor llega a la sección más fría del dispositivo, que está en contacto con un disipador de calor, transfiere su calor latente a la pared del dispositivo.

Al perder esta energía, el vapor se condensa y vuelve a su estado líquido.<sup>13</sup>

4. **Retorno Capilar:** La estructura de mecha (wick), que es una estructura porosa hecha de materiales como polvo de cobre sinterizado, ranuras o mallas metálicas, recubre la superficie interna del dispositivo. A través de la acción capilar, la mecha transporta pasivamente el líquido condensado de vuelta a la sección del evaporador, en contra de la gravedad si es necesario, para completar el ciclo.<sup>13</sup>

Este ciclo es continuo, rápido y completamente pasivo, sin necesidad de piezas móviles ni de energía externa, lo que lo convierte en una solución de refrigeración extremadamente fiable.

### 3.2. Análisis de Rendimiento: Conductividad Térmica y Límites Operativos

La métrica de rendimiento clave para los dispositivos de cambio de fase es su **conductividad térmica efectiva (keff)**. Gracias al transporte de calor a través del cambio de fase, estos dispositivos alcanzan valores de keff extraordinariamente altos, que pueden oscilar entre 1,500 y 100,000 W/mK en aplicaciones de refrigeración de electrónica.<sup>18</sup> Esto es órdenes de magnitud superior a la conductividad del cobre sólido (~390 W/mK) o del aluminio (~200 W/mK).<sup>19</sup> Esta propiedad les permite transportar grandes cantidades de calor a distancias considerables con una caída de temperatura mínima a lo largo de su longitud.

Sin embargo, el funcionamiento de un tubo de calor o una cámara de vapor está limitado por varios fenómenos físicos que definen su envolvente operativa <sup>23</sup>:

- **Límite Capilar:** Es el límite más común en aplicaciones terrestres. Se alcanza cuando la fuerza de bombeo capilar de la mecha es insuficiente para superar las pérdidas de presión del líquido y el vapor y devolver suficiente líquido al evaporador. Si se excede este límite, el evaporador se "seca" (dry-out), el ciclo de cambio de fase se detiene y la transferencia de calor se reduce drásticamente a la simple conducción a través de la carcasa metálica.<sup>14</sup> La capacidad de funcionar contra la gravedad depende de la potencia de esta acción capilar.
- **Límite de Ebullición:** Ocurre si el flujo de calor en la superficie del evaporador es tan intenso que provoca la nucleación de burbujas dentro de la estructura de la mecha. Estas burbujas pueden obstruir el flujo de retorno del líquido, provocando también un dry-out localizado.<sup>24</sup>
- **Límite de Arrastre (Entrainment):** A altas velocidades de vapor, el flujo de vapor puede ejercer una fuerza de cizallamiento sobre la superficie del líquido en la mecha, arrastrando gotas de líquido hacia el condensador. Esto interrumpe el ciclo de retorno del líquido y puede provocar un fallo.<sup>23</sup>
- **Límites de Viscosidad y Sónico:** Estos límites son más relevantes a bajas temperaturas de funcionamiento (cerca del punto de congelación del fluido) o en tubos de calor de alta temperatura que utilizan metales líquidos como fluido de trabajo. En estas condiciones, la baja densidad del vapor puede hacer que las fuerzas viscosas dominen el flujo o que la velocidad del vapor alcance la velocidad del sonido,



"estrangulando" el flujo de masa.<sup>23</sup>

### 3.3. Evaluación Comparativa: Tubos de Calor vs. Cámaras de Vapor

Aunque ambos dispositivos funcionan con el mismo principio, su geometría y construcción los hacen adecuados para diferentes tipos de aplicaciones térmicas. La elección entre un tubo de calor y una cámara de vapor para la IPU depende de la naturaleza de la fuente de calor y del objetivo de la disipación.

- **Tubos de Calor (Heat Pipes):**

- **Función:** Son fundamentalmente transportadores de calor **lineales**. Son ideales para mover el calor desde una fuente pequeña y concentrada hasta un disipador de calor remoto, a menudo a distancias superiores a 50 mm.<sup>28</sup>
- **Ventajas:** Ofrecen una gran flexibilidad de diseño, ya que pueden ser doblados y conformados para adaptarse a geometrías complejas dentro de un sistema. Generalmente, son más económicos y rápidos de fabricar que las cámaras de vapor.<sup>29</sup>
- **Desventajas:** Su capacidad de transferencia de calor se reduce con cada curvatura.<sup>28</sup> No son eficaces para esparcir el calor de manera uniforme sobre un área grande.

- **Cámaras de Vapor (Vapor Chambers):**

- **Función:** Son esparcidores de calor **planares**. Actúan como una "base de disipador de calor" de muy alta conductividad, tomando el calor de una fuente concentrada y distribuyéndolo uniformemente sobre toda su superficie.<sup>15</sup>
- **Ventajas:** Son muy superiores a los tubos de calor para gestionar altas densidades de flujo de calor (típicamente  $>25\text{--}50\text{ W/cm}^2$ ).<sup>28</sup> Proporcionan una superficie altamente isotérmica, lo que es ideal para acoplar múltiples componentes o para asegurar que un disipador de calor grande se utilice de manera eficiente. Pueden fabricarse con perfiles muy finos (hasta 0.25 mm), lo que es crucial para aplicaciones con restricciones de espacio.<sup>30</sup>
- **Desventajas:** Son más caras y complejas de fabricar. Su flexibilidad de diseño es limitada en comparación con los tubos de calor, ya que son inherentemente planares.<sup>28</sup>

### 3.4. Propuesta de Diseño para la Transferencia de Calor desde el Lado Caliente del TEC

Para la aplicación específica de la IPU, donde se debe disipar el calor del lado caliente de un módulo TEC, se recomienda el uso de una **cámara de vapor**.

La justificación para esta elección se basa en la naturaleza de la fuente de calor. El lado

caliente de un TEC, aunque pueda tener una superficie de varias decenas de milímetros cuadrados, concentra una carga térmica muy elevada (~700 W) en un área relativamente pequeña. Esto da como resultado una alta densidad de flujo de calor. El principal beneficio de una cámara de vapor en este escenario es su capacidad para absorber este alto flujo de calor y esparcirlo rápidamente por toda su superficie.<sup>28</sup> Al hacerlo, transforma una fuente de calor pequeña y de alta intensidad en una fuente de calor más grande y de baja intensidad con una temperatura muy uniforme.

Esta superficie isotérmica creada por la cámara de vapor es ideal para la siguiente etapa del sistema de gestión térmica. Servirá como la superficie de montaje perfecta para la matriz de Generadores Termoeléctricos (TEGs) y/o la base del disipador de calor final. El uso de una cámara de vapor asegura que todos los TEGs montados sobre ella vean una temperatura de lado caliente muy similar, maximizando la eficiencia de la matriz. Aunque se podría utilizar un conjunto de tubos de calor incrustados en una placa de cobre, una única cámara de vapor proporciona una solución más elegante, de menor resistencia térmica y más eficaz para esta interfaz crítica.

Una consideración de diseño fundamental es el "arranque en frío". El fluido de trabajo óptimo para el rango de temperatura de funcionamiento de la IPU (con temperaturas de unión de semiconductores < 150°C) es el agua desionizada, que opera eficazmente en el rango de 20°C a 150°C.<sup>25</sup> Sin embargo, por debajo de aproximadamente 25°C, la capacidad de transferencia de calor de un tubo de calor de agua disminuye drásticamente, y por debajo de 0°C, el agua se congela y el mecanismo de cambio de fase cesa por completo, dejando solo la conducción a través de la carcasa de cobre.<sup>25</sup> Esto implica que si la IPU se enciende en un ambiente frío (por ejemplo, -20°C), la cámara de vapor no funcionará inicialmente. La ruta de disipación térmica tendrá una resistencia mucho mayor. Para evitar un sobrecalentamiento localizado y catastrófico del TEC y los semiconductores durante esta fase, el sistema de control de la IPU<sup>1</sup> debe implementar un modo de "calentamiento". En este modo, la potencia o la frecuencia de los pulsos del "Pistón Atómico" deben ser limitadas hasta que el sistema de gestión térmica alcance su temperatura de funcionamiento efectiva (aproximadamente 25°C). Este requisito establece un vínculo crítico e ineludible entre el firmware de control y el diseño del hardware térmico.

## **4.0 Recuperación de Calor Residual mediante Generadores Termoeléctricos (TEGs)**

Más allá de la simple disipación, el calor residual de la IPU representa una fuente de energía sin explotar. La integración de Generadores Termoeléctricos (TEGs) ofrece la posibilidad no solo de contribuir a la disipación del calor, sino también de convertir una parte de esa energía térmica en energía eléctrica utilizable, mejorando así la eficiencia global del sistema.

### **4.1. Principios de la Generación Termoeléctrica mediante el Efecto**

## Seebeck

La generación de energía en un TEG se basa en el **efecto Seebeck**, un fenómeno termoeléctrico descubierto por Thomas Johann Seebeck en 1821. Este efecto describe cómo se genera una diferencia de potencial (voltaje) en un conductor o semiconductor cuando se somete a un gradiente de temperatura.<sup>34</sup>

El mecanismo físico subyacente implica la difusión de portadores de carga (electrones en materiales de tipo n y "huecos" en materiales de tipo p) desde el extremo caliente del material hacia el extremo frío. Este movimiento de cargas, impulsado por la energía térmica, crea una acumulación de carga en el extremo frío, lo que resulta en un campo eléctrico y, por tanto, en un voltaje.<sup>35</sup> La magnitud de este voltaje, conocido como voltaje Seebeck, es directamente proporcional a la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre los dos extremos y a una propiedad del material llamada **coeficiente de Seebeck**

( $\alpha$ ), expresada en voltios por Kelvin (V/K).<sup>36</sup>

Un único par de semiconductores p-n genera un voltaje muy pequeño. Para producir un voltaje y una corriente utilizables, un módulo TEG práctico se construye con múltiples de estos pares de semiconductores (o "patas"), que están conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Estos pares se intercalan entre dos placas cerámicas, que actúan como sustratos y aislantes eléctricos mientras conducen el calor.<sup>39</sup> Al conectar muchos pares en serie, sus voltajes individuales se suman, produciendo un voltaje de salida útil a nivel de módulo.

## 4.2. Selección y Caracterización de Módulos TEG

La selección de un módulo TEG adecuado para la IPU requiere un análisis cuidadoso de sus parámetros de rendimiento en el contexto de las condiciones operativas esperadas. Los parámetros clave que se encuentran en las hojas de datos del fabricante son <sup>41</sup>:

- **Potencia de Salida con Carga Adaptada (W):** La potencia eléctrica máxima que el módulo puede generar cuando la resistencia de la carga externa es igual a la resistencia interna del módulo.
- **Voltaje de Circuito Abierto (Voc):** El voltaje máximo generado cuando no hay carga conectada.
- **Resistencia Interna (Rint):** La resistencia eléctrica inherente del módulo. Es un parámetro crucial para el diseño del circuito de acondicionamiento de potencia, ya que la máxima transferencia de potencia se logra cuando la resistencia de la carga coincide con la resistencia interna del TEG (adaptación de impedancias).
- **Resistencia/Conductancia Térmica (K/W o W/mK):** Este es un parámetro de doble filo. Describe la caída de temperatura a través del módulo por unidad de flujo de calor. Una alta resistencia térmica es deseable para crear un gran  $\Delta T$  y maximizar la generación de energía, pero es perjudicial para la función principal de refrigeración, ya

que impide el flujo de calor desde la fuente caliente al disipador final. Para la IPU, con una carga térmica de ~700 W y una temperatura esperada en el lado caliente (suministrada por la cámara de vapor) de 80-90°C y una temperatura en el lado frío (en el disipador) de 40-50°C, el  $\Delta T$  operativo será de aproximadamente 40-50°C. La selección se centrará en módulos TEG optimizados para este rango de temperatura o en la extrapolación de los datos de rendimiento de módulos de alta temperatura. Por ejemplo, módulos como el TEG1-24111-6.0, que produce 17.6 W con un  $\Delta T$  de 270°C<sup>45</sup>, o los módulos de 10 W y 19 W de TEGmart<sup>43</sup>, servirán como punto de partida. Sus curvas de rendimiento se utilizarán para estimar la potencia de salida en el  $\Delta T$  más bajo de la IPU.

### 4.3. Diseño de Matrices de TEG: Configuraciones Serie-Paralelo

Un solo módulo TEG no proporcionará ni el voltaje ni la corriente suficientes para ser prácticamente útil. Por lo tanto, es necesario conectar múltiples módulos en una matriz.<sup>39</sup> La configuración de esta matriz es una decisión de diseño crítica:

- **Conexión en Serie:** Conectar los módulos en serie suma sus voltajes de salida ( $V_{total} = N_{serie} \times V_{módulo}$ ), lo que permite alcanzar niveles de voltaje utilizables (por ejemplo, 5 V o 12 V). Sin embargo, también suma sus resistencias internas ( $R_{total} = N_{serie} \times R_{módulo}$ ), y la corriente total de la cadena queda limitada por el módulo con el rendimiento más bajo.<sup>40</sup> Esto es un problema si hay gradientes de temperatura no uniformes a través de la superficie de montaje, ya que algunos módulos generarán menos corriente, estrangulando a toda la serie.
- **Conexión en Paralelo:** Conectar los módulos en paralelo suma sus capacidades de corriente ( $I_{total} = N_{paralelo} \times I_{módulo}$ ) y reduce la resistencia interna total. Esta configuración es más tolerante a los desajustes de corriente, pero requiere que todos los módulos tengan voltajes de salida muy similares para evitar corrientes de circulación ineficientes o dañinas entre ellos.<sup>40</sup>
- **Configuración Serie-Paralelo:** La solución más práctica es una matriz mixta, con varias cadenas de módulos en serie conectadas en paralelo. Esto permite diseñar un punto de funcionamiento de voltaje y corriente específico. El diseño debe tener en cuenta la distribución de la temperatura en la superficie de la cámara de vapor para agrupar los módulos con condiciones térmicas similares, maximizando así la eficiencia de la matriz.

Una estrategia avanzada, aunque compleja, implica el uso de una matriz reconfigurable. Mediante conmutadores de estado sólido, la conexión eléctrica entre los módulos podría cambiarse dinámicamente entre configuraciones en serie y en paralelo para optimizar la salida de potencia en función de las condiciones térmicas cambiantes del sistema.<sup>51</sup>

### 4.4. Modelado del Potencial de Generación de Energía a partir del

## Calor Residual de la IPU

Se puede realizar una estimación de primer orden de la potencia eléctrica recuperable. La potencia máxima ( $P_{max}$ ) que un TEG puede entregar a una carga adaptada viene dada por la ecuación <sup>54</sup>:

$$P_{max} = 4 \cdot R_{int} (N \cdot \alpha \cdot \Delta T)^2$$

donde:

- $N$  es el número de pares termoelectrónicos en el módulo.
- $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck del material.
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre el lado caliente y el lado frío del TEG.
- $R_{int}$  es la resistencia interna del módulo.

Para una estimación práctica, se utilizarán las curvas de rendimiento de las hojas de datos. Tomemos como ejemplo el módulo TEG de 10 W de TEGmart <sup>43</sup>, que produce 10 W a una temperatura del lado caliente de 330°C. Asumiendo que el lado frío está a 30°C, el  $\Delta T$  nominal es de 300°C. Para la aplicación de la IPU, con un  $\Delta T$  estimado de 40°C, la potencia de salida se reducirá significativamente. Dado que la potencia es aproximadamente proporcional a  $(\Delta T)^2$ , una estimación de primer orden sería:

$$P_{estimada} \approx P_{nominal} \times (\Delta T_{nominal} / \Delta T_{operativo})^2 \approx 10W \times (300^\circ C / 40^\circ C)^2 \approx 10W \times (0.0178) \approx 0.178W$$

Esto sugiere que un solo módulo podría generar alrededor de 180 mW. Si se monta una matriz de 16 de estos módulos en la cámara de vapor, la potencia total recuperada podría estar en el rango de 2.88 W. Una matriz de 32 módulos podría acercarse a los 6 W. Un análisis más detallado en el informe completo, utilizando las curvas de rendimiento específicas del fabricante, refinará esta estimación.

La decisión de incorporar TEGs en el TMS de la IPU no es una simple adición para mejorar la eficiencia. Introduce un compromiso de diseño fundamental y complejo. El objetivo principal del TMS es minimizar la temperatura de la unión del semiconductor, lo que requiere la menor resistencia térmica posible desde la unión hasta el ambiente. Sin embargo, la generación de energía en un TEG depende de mantener una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) a través de él. Esta  $\Delta T$  solo puede existir si el propio TEG presenta una resistencia térmica significativa. <sup>56</sup>

Al colocar una matriz de TEGs entre la cámara de vapor y el disipador de calor final, se inserta una capa de resistencia térmica ( $R_{th,TEG}$ ) en la ruta de disipación primaria. La resistencia térmica total del sistema ( $R_{th,total}$ ) se convierte en la suma de las resistencias de cada capa:

$$R_{th,total} = R_{th,TEC} + R_{th,TIM1} + R_{th,VC} + R_{th,TIM2} + R_{th,TEG} + R_{th,TIM3} + R_{th,disipador}$$

El aumento de la temperatura en la unión del semiconductor por encima de la temperatura ambiente está directamente relacionado con esta resistencia total:  $T_{union} = T_{ambiente} + Q \times R_{th,total}$ . Al aumentar  $R_{th,total}$  con la adición de los TEGs, la temperatura de la unión inevitablemente aumentará para la misma carga de calor  $Q$ , a menos que la resistencia térmica del disipador de calor final se reduzca drásticamente para compensar.

Esto crea un dilema de optimización:

- Para **maximizar la refrigeración**, se debe minimizar  $R_{th,total}$ , lo que implicaría eliminar

los TEGs por completo.

- Para **maximizar la potencia recuperada**, se debe maximizar el  $\Delta T$  a través de los TEGs. Esto se puede lograr aumentando la resistencia térmica de los TEGs o disminuyendo drásticamente la resistencia térmica del disipador final (es decir, utilizando un disipador mucho más grande, pesado y caro).

Por lo tanto, el diseño de un sistema híbrido con TEG no es una simple suma de beneficios. Es un ejercicio de ingeniería de sistemas que debe equilibrar cuidadosamente los objetivos contrapuestos de rendimiento de refrigeración y recuperación de energía. Esta compensación será un tema central en el análisis comparativo.

## 5.0 Diseño y Viabilidad de un Sistema de Refrigeración Híbrido Integrado

Basándose en el análisis de los componentes individuales, esta sección propone un diseño conceptual para un sistema de gestión térmica híbrido e integrado, que combina las tecnologías de cambio de fase y de generación termoeléctrica. Se detallará la arquitectura del sistema, se analizarán los componentes críticos como los materiales de interfaz térmica (TIM) y el conjunto de disipación final, y se abordará la necesidad de un modelado transitorio.

### 5.1. Diseño Conceptual: Un Sistema de Matriz de TEG Acoplado a una Cámara de Vapor

Se propone una arquitectura de apilamiento térmico (thermal stack-up) multicapa para gestionar la carga térmica pulsada de  $\sim 700\text{--}750\text{ W}$  de la IPU. El diseño conceptual, que busca equilibrar la disipación de calor de alto flujo, la uniformidad de la temperatura y la recuperación de energía, se estructura de la siguiente manera, desde la fuente de calor hasta el ambiente:

1. **Fuente de Calor:** La superficie caliente de un módulo TEC, que enfría directamente los semiconductores de potencia de la IPU. La carga térmica es de  $\sim 700\text{--}750\text{ W}$ , pulsada y concentrada en un área pequeña.
2. **Material de Interfaz Térmica (TIM 1):** Una capa de alta conductividad para asegurar una transferencia de calor eficiente desde el TEC.
3. **Cámara de Vapor (Vapor Chamber):** El primer componente activo de disipación. Su función es absorber el alto flujo de calor del TEC y esparcirlo de manera uniforme sobre su superficie superior, que es mucho más grande. Esto transforma la fuente de calor puntual en una fuente de calor planar e isotérmica.
4. **Material de Interfaz Térmica (TIM 2):** Una capa de TIM para acoplar la cámara de vapor a la matriz de TEG.
5. **Matriz de Generadores Termoeléctricos (TEG):** Múltiples módulos TEG dispuestos en

una configuración serie-paralelo sobre la superficie de la cámara de vapor. El lado caliente de los TEGs absorbe el calor de la cámara de vapor.

6. **Material de Interfaz Térmica (TIM 3):** Una capa de TIM para acoplar la matriz de TEG al disipador de calor final.
7. **Disipador de Calor Final:** Un disipador de calor de alto rendimiento, probablemente de aluminio o cobre con aletas, diseñado para transferir el calor residual al aire ambiente.
8. **Conjunto de Ventiladores:** Uno o más ventiladores de convección forzada para maximizar la tasa de transferencia de calor desde el disipador de calor al aire.

Este enfoque integrado aprovecha las fortalezas de cada tecnología: la cámara de vapor gestiona el alto flujo de calor inicial, la matriz de TEG recupera una parte de la energía térmica de bajo grado, y el conjunto de disipador y ventilador proporciona la disipación final de calor al ambiente.<sup>62</sup>

A continuación, se presenta una tabla que conceptualiza el apilamiento térmico y la red de resistencias/capacitancias asociadas, fundamental para el modelado del sistema.

**Tabla 5.1: Apilamiento Térmico Conceptual y Red de Resistencia-Capacitancia**

Capa	Componente	Material Típico	Resistencia Térmica (Rth) [K/W]	Capacitancia Térmica (Cth) [J/K]	Notas
1	Unión del Semiconductor	Silicio (Si) / Carburo de Silicio (SiC)	-	Baja	La fuente de calor pulsado.
2	Módulo TEC (Lado Caliente)	Cerámica (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	Baja	Interfaz con el sistema de refrigeración.
3	TIM 1	Grasa térmica / Lámina de grafito	Baja (e.g., 0.01 - 0.05)	Muy Baja	Crítica para la transferencia de calor inicial.
4	Cámara de Vapor	Cobre / Agua	Muy Baja (e.g., <0.01)	Media	Esparcidor de calor de alto flujo.
5	TIM 2	Grasa térmica / Lámina de grafito	Baja (e.g., 0.01 - 0.05)	Muy Baja	Interfaz entre VC y TEG.
6	Matriz de TEG	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> / Cerámica	<b>Media-Alta (e.g., 0.1 - 0.5 total)</b>	Media	Añade resistencia térmica significativa.
7	TIM 3	Grasa térmica / Lámina de grafito	Baja (e.g., 0.01 - 0.05)	Muy Baja	Interfaz entre TEG y disipador.
8	Disipador de	Aluminio /	Baja (e.g.,	Alta	Disipación final

	Calor	Cobre	0.036)		al aire.
9	Interfaz Disipador-Aire	-	Dependiente del flujo de aire	-	Dominada por la convección forzada.

Esta tabla es fundamental para el análisis, ya que cuantifica las propiedades térmicas de cada capa. Permite un cálculo de primer orden de la temperatura de la unión en estado estacionario ( $T_{unión} = T_{ambiente} + Q_{total} \times \Sigma R_{th}$ ) y sirve como base para un modelo transitorio más complejo. Al visualizar las resistencias, se hace evidente el impacto de cada componente, especialmente la resistencia térmica significativa introducida por la matriz de TEG, que debe ser compensada por el resto del sistema.

## 5.2. Gestión de la Interfaz Térmica (TIM)

La eficacia de un sistema de refrigeración multicapa depende críticamente de la calidad de las interfaces térmicas. Cada capa de Material de Interfaz Térmica (TIM) introduce una resistencia térmica adicional, y si no se gestiona adecuadamente, esta resistencia de contacto puede convertirse en el cuello de botella del sistema, anulando los beneficios de los componentes de alto rendimiento.<sup>56</sup>

Para la IPU, se deben minimizar las resistencias en las tres interfaces clave: TEC-Cámara de Vapor, Cámara de Vapor-TEG y TEG-Disipador. Las opciones para el TIM incluyen:

- **Grasas Térmicas de Alta Conductividad:** Compuestos a base de silicona o metal líquido que rellenan los huecos microscópicos entre las superficies, ofreciendo una baja resistencia térmica.
- **Láminas de Grafito:** Proporcionan una excelente conductividad térmica en el plano y son una buena opción para superficies planas y grandes. Algunos fabricantes de TEG, como TEGmart, ya incluyen láminas de grafito en sus módulos para simplificar la instalación y garantizar un buen contacto térmico.<sup>43</sup>
- **Soldadura:** Para una unión permanente y de muy baja resistencia térmica, aunque esto introduce estrés termomecánico y dificulta el mantenimiento.

Además del material, la **presión de montaje** es un factor crítico. Una presión de sujeción adecuada y uniforme es esencial para minimizar el grosor de la capa de TIM y, por lo tanto, su resistencia térmica. Sin embargo, una presión excesiva puede dañar los frágiles módulos cerámicos de los TECs y TEGs.<sup>56</sup> El diseño mecánico del conjunto de sujeción debe ser cuidadosamente considerado para aplicar una fuerza controlada y distribuida de manera uniforme.

## 5.3. Disipación de Calor Secundaria: Dimensionamiento del Conjunto Final de Disipador y Ventilador

El calor total que debe ser evacuado por el sistema de disipación final es la suma del calor



generado por la IPU ( $Q_{pico} \approx 733 \text{ W}$ ) más las ineficiencias del propio módulo TEC. El sistema de referencia análogo utilizaba un disipador **SEMIKRON P16/300** y un ventilador radial **SKF16B-230-01**.<sup>1</sup>

Analicemos esta selección de referencia:

- El disipador P16/300 tiene una resistencia térmica especificada de **0.036 K/W**.<sup>70</sup>
- El ventilador SKF16B-230-01 proporciona un flujo de aire de **610 m<sup>3</sup>/h**.<sup>71</sup>

El aumento de temperatura del disipador sobre el aire ambiente se puede estimar como  $\Delta T = R_{th} \times Q = 0.036 \text{ K/W} \times 733 \text{ W} \approx 26.4^\circ\text{C}$ . Este cálculo es consistente con los resultados de la simulación del documento de referencia, que mostraban una temperatura del disipador de  $60^\circ\text{C}$  en un ambiente de  $40^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ), lo que valida la idoneidad de esta combinación para la carga de calor base.<sup>1</sup>

Sin embargo, para el sistema híbrido propuesto, se debe tener en cuenta la resistencia térmica adicional de la matriz de TEG. Si la matriz de TEG añade, por ejemplo,  $0.1 \text{ K/W}$  a la resistencia térmica total, la temperatura del lado caliente de los TEGs (y por tanto, de la cámara de vapor y del TEC) aumentará significativamente si se mantiene el mismo disipador. Para mantener la misma temperatura en el lado caliente del TEC, se necesitaría un disipador con una resistencia térmica mucho menor para compensar. Esto podría requerir un disipador de aire forzado más grande y potente, o la transición a una tecnología de refrigeración superior.

Una opción avanzada para la disipación final es la **refrigeración líquida por microcanales**. Estas placas frías (cold plates) ofrecen resistencias térmicas que son de 10 a 100 veces más bajas que otras soluciones de refrigeración líquida y pueden disipar flujos de calor superiores a  $1 \text{ kW/cm}^2$ .<sup>73</sup> La implementación de una placa fría de microcanales como disipador final:

- Minimizaría drásticamente la temperatura del lado frío de los TEGs.
- Maximizaría el  $\Delta T$  a través de la matriz de TEG, aumentando significativamente la potencia eléctrica recuperada.
- Permitiría un sistema global mucho más compacto que una solución de refrigeración por aire de rendimiento equivalente.

El coste y la complejidad de un bucle de refrigeración líquida (placa fría, bomba, radiador, tuberías) son considerablemente mayores, pero representa la solución de mayor rendimiento térmico.

## 5.4. Modelado Térmico Transitorio del Sistema Híbrido bajo Operación Pulsada de la IPU

Un análisis en estado estacionario, aunque útil para el dimensionamiento inicial, es insuficiente para capturar la física real del sistema térmico de la IPU. La naturaleza pulsada de la carga de calor exige un análisis transitorio para predecir con precisión el comportamiento térmico del sistema y garantizar su fiabilidad.

Tanto los tubos de calor como los sistemas de refrigeración líquida tienen una respuesta dinámica a las cargas de calor pulsadas.<sup>81</sup> Por ejemplo, un tubo de calor puede soportar

cargas de calor superiores a su límite capilar de estado estacionario durante breves períodos antes de que ocurra el "dry-out".<sup>88</sup> La capacidad de un sistema de refrigeración para gestionar un pulso de calor depende no solo de su resistencia térmica ( $R_{th}$ ) sino también de su capacitancia térmica ( $C_{th}$ ).

Para modelar este comportamiento, se propone el uso de una **red de circuito térmico RC equivalente**. En esta analogía, la temperatura es análoga al voltaje, el flujo de calor a la corriente, la resistencia térmica a la resistencia eléctrica y la capacitancia térmica a la capacitancia eléctrica.<sup>89</sup> El apilamiento térmico detallado en la Tabla 5.1 se puede traducir en un modelo de circuito RC en cascada.

El objetivo de este modelo transitorio es simular la respuesta del sistema a un pulso de potencia de la IPU y determinar la **temperatura de unión máxima ( $T_{j,pico}$ )** alcanzada durante el pulso. Este valor, y no la temperatura promedio, es el verdadero factor limitante para la fiabilidad del semiconductor. El modelo permitirá evaluar cómo la capacitancia térmica de la cámara de vapor y del disipador de calor ayuda a "amortiguar" los picos de calor, y si la respuesta del sistema es lo suficientemente rápida para evitar que la temperatura de la unión exceda los límites de seguridad durante los pulsos de alta frecuencia.

## 5.5. Rendimiento Estimado: Disipación de Calor Total y Potencia Eléctrica Recuperada

Sintetizando los análisis anteriores, se puede proyectar el rendimiento del sistema híbrido propuesto.

- **Rendimiento Térmico:** El sistema estará diseñado para disipar una carga térmica de pico de hasta 733 W. Con una solución de refrigeración por aire forzado bien diseñada (basada en el disipador P16/300 y el ventilador SKF16B-230-01), se puede esperar que la temperatura del lado frío de los TEGs se mantenga en el rango de 50-60°C en un ambiente de 40°C. La cámara de vapor mantendrá una temperatura uniforme en el lado caliente de los TEGs, estimada en 80-90°C, lo que resulta en un  $\Delta T$  a través de los TEGs de aproximadamente 30-40°C. El objetivo principal, mantener la  $T_j$  de los semiconductores por debajo de 150°C, se considera alcanzable, aunque el análisis transitorio es necesario para confirmar los márgenes de seguridad durante los picos de pulso.
- **Potencia Eléctrica Recuperada:** Basado en el modelado preliminar de la Sección 4.4, una matriz de TEGs que cubra la superficie de la cámara de vapor podría generar entre **5 y 15 W** de potencia eléctrica. La cifra exacta dependerá del  $\Delta T$  final logrado, que está directamente influenciado por el rendimiento del disipador de calor final.
- **Eficiencia Neta del Sistema de Refrigeración:** El ventilador SKF16B-230-01 consume entre 160 W y 185 W de potencia eléctrica.<sup>94</sup> La potencia neta del sistema de gestión térmica sería, por lo tanto, un consumo neto. Por ejemplo, si se recuperan 10 W de los TEGs y el ventilador consume 170 W, el consumo neto del TMS es de 160 W. Aunque el sistema no es un generador neto de energía, la potencia recuperada por los TEGs

reduce el consumo de energía parásita del sistema de refrigeración, mejorando ligeramente la eficiencia general de la IPU. El verdadero valor de la energía recuperada puede residir más en su contribución a la resiliencia del sistema que en el ahorro de energía puro.

## 6.0 Análisis Comparativo y Viabilidad a Nivel de Sistema

La selección de una estrategia de gestión térmica para la IPU no puede basarse únicamente en el rendimiento térmico. Debe ser el resultado de un análisis holístico que considere el rendimiento, el coste, la complejidad y la fiabilidad. Esta sección compara directamente la solución de refrigeración de máximo rendimiento con la solución híbrida de recuperación de energía.

### 6.1. Comparación de Rendimiento: Sistema de Cámara de Vapor Únicamente vs. Sistema Híbrido de Cámara de Vapor-TEG

Se evalúan dos arquitecturas de diseño primarias para la disipación del calor del lado caliente del TEC:

1. **Opción A: Refrigeración de Máximo Rendimiento:** En esta configuración, una cámara de vapor se acopla directamente a una solución de refrigeración de muy baja resistencia térmica, como una placa fría de refrigeración líquida por microcanales. El único objetivo de este diseño es minimizar la resistencia térmica total desde la unión del semiconductor hasta el fluido refrigerante, logrando así la temperatura de funcionamiento más baja posible para los componentes de la IPU.
2. **Opción B: Refrigeración con Recuperación de Energía (Híbrida):** Esta es la arquitectura propuesta en la Sección 5, que intercala una matriz de TEG entre la cámara de vapor y un disipador de calor final refrigerado por aire forzado. Este diseño busca un equilibrio entre la refrigeración y la eficiencia energética.

La comparación cuantitativa se basa en las siguientes métricas clave:

- **Resistencia Térmica Total (Unión a Ambiente):** La Opción A ofrecerá una resistencia térmica significativamente menor. La eliminación de la matriz de TEG y sus dos capas de TIM asociadas, junto con la transición de la refrigeración por aire a la líquida por microcanales, podría reducir la resistencia térmica del sistema de disipación secundario en un orden de magnitud o más.
- **Temperatura de Unión de Pico ( $T_{j,pico}$ ):** Como resultado directo de la menor resistencia térmica, la Opción A mantendrá una  $T_{j,pico}$  más baja bajo las mismas condiciones de carga pulsada. Esto se traduce en mayores márgenes de seguridad, una vida útil más larga de los componentes y/o la capacidad de operar la IPU a mayores

potencias o frecuencias de pulso.

- **Eficiencia Energética Neta:** La Opción A tendrá un consumo de energía parásita (debido a la bomba del líquido refrigerante) sin ninguna recuperación. La Opción B, aunque probablemente tenga un mayor consumo de energía bruta debido a un ventilador potencialmente más potente para superar la mayor resistencia térmica, recuperará una pequeña porción de energía a través de los TEGs. El balance energético neto dependerá de la eficiencia de la bomba frente al ventilador y de la cantidad de energía recuperada. En la mayoría de los casos, la Opción A probablemente seguirá siendo más eficiente desde el punto de vista del consumo de energía del propio sistema de refrigeración, pero la Opción B mejora la eficiencia global del sistema IPU al recuperar el calor residual.

## 6.2. Análisis de Coste-Beneficio: Inversión Inicial vs. Ganancias de Eficiencia a Largo Plazo

El análisis económico revela un claro compromiso entre el coste de la lista de materiales (BOM) y los beneficios operativos.

- **Costes de Componentes e Inversión Inicial:**
  - **Opción A (Máximo Rendimiento):** El coste principal aquí es el sistema de refrigeración líquida. Las placas frías de microcanales, las bombas de grado industrial, los radiadores y las tuberías representan una inversión inicial significativamente mayor que un sistema de aire forzado.
  - **Opción B (Híbrida):** El coste de los componentes individuales (disipador de calor, ventilador) es menor. Sin embargo, el coste total se ve incrementado por la adición de la matriz de TEGs y el acondicionamiento de potencia asociado. Los módulos TEG de alta potencia pueden ser costosos. Además, la complejidad del montaje es mayor, lo que aumenta los costes de fabricación. En general, se espera que la Opción A tenga un coste de BOM inicial más alto debido a la infraestructura de refrigeración líquida.
- **Análisis de Beneficios y Retorno de la Inversión (ROI):**
  - El principal beneficio cuantificable de la Opción B es el valor de la energía eléctrica recuperada. Suponiendo una recuperación de 10 W, el valor económico de esta energía durante la vida útil de la IPU se puede calcular. Sin embargo, es probable que el período de retorno de la inversión para la complejidad adicional del sistema TEG sea largo si solo se considera el ahorro en el coste de la electricidad.
  - El valor de la Opción B puede verse de forma análoga a las estrategias de **peak shaving (reducción de picos)** en aplicaciones industriales. En estas aplicaciones, se invierte en sistemas de almacenamiento de energía o generación local no para el ahorro de energía base, sino para reducir los costosos cargos por demanda de pico de la red eléctrica.<sup>95</sup> De manera similar, el sistema TEG "reduce

el pico" de la demanda de energía parásita de la IPU, lo que podría ser valioso en aplicaciones con energía limitada.

### 6.3. Consideraciones de Fiabilidad y Complejidad

- **Fiabilidad:** Desde una perspectiva de fiabilidad pura, un sistema más simple es inherentemente más fiable. La Opción A, aunque utiliza refrigeración líquida (que introduce posibles puntos de fallo como fugas o fallos de la bomba), tiene menos componentes y menos interfaces térmicas que la Opción B. El sistema híbrido (Opción B) introduce la matriz de TEG y múltiples capas de TIM, cada una de las cuales es un punto potencial de fallo. La degradación a largo plazo de los módulos TEG y las interfaces TIM bajo ciclos térmicos es una preocupación. Para mitigar estos riesgos, se recomienda encarecidamente un **Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA)**. Un FMEA es un proceso sistemático para identificar posibles modos de fallo en un diseño, evaluar sus efectos y priorizar acciones para eliminarlos o mitigarlos.<sup>98</sup>
- **Complejidad del Sistema:** La Opción B es intrínsecamente más compleja. La salida de una matriz de TEG es típicamente un voltaje bajo y una corriente alta. Para que esta energía sea utilizable por los sistemas auxiliares de la IPU (que probablemente funcionen a 3.3 V, 5 V o 12 V), se requiere un convertidor DC-DC especializado (probablemente un convertidor boost). Este convertidor añade complejidad al diseño electrónico, coste al BOM y otro punto potencial de fallo.

El valor de la energía recuperada por el sistema TEG puede trascender el simple cálculo económico. En muchas de las aplicaciones previstas para una Unidad de Potencia Inteligente, como las microrredes o los sistemas autónomos fuera de la red <sup>1</sup>, la disponibilidad y la resiliencia de la energía son más críticas que el coste por vatio. En un escenario de fallo de la fuente de alimentación principal o de agotamiento de la batería, el calor residual de los componentes de potencia puede persistir durante un tiempo. Un sistema TEG podría aprovechar este calor residual para generar unos pocos vatios de energía de supervivencia. Esta pequeña cantidad de energía podría ser suficiente para alimentar el microcontrolador central del sistema (por ejemplo, un ESP32 en modo de bajo consumo <sup>1</sup>), sensores críticos y un módulo de comunicaciones. Esto permitiría a la IPU mantener un estado de "arranque en negro", informar de su estado, diagnosticar el fallo o esperar comandos de reactivación sin depender de su almacenamiento de energía principal. Esta capacidad transforma al subsistema TEG de un mero "impulsor de eficiencia" a un "potenciador de la fiabilidad y la disponibilidad", un valor que podría ser crítico para la misión dependiendo de la aplicación final de la IPU.

## 7.0 Conclusiones y Recomendaciones

Este informe ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de las tecnologías avanzadas de gestión

térmica y recuperación de calor residual para la Unidad de Potencia Inteligente (IPU). La investigación se ha centrado en la viabilidad y el diseño de sistemas que utilizan dispositivos de cambio de fase (tubos de calor/cámaras de vapor) y generadores termoeléctricos (TEGs) para gestionar la carga térmica pulsada, estimada en hasta 733 W, generada por el módulo "Pistón Atómico".

## 7.1. Resumen de los Hallazgos

1. **Naturaleza de la Carga Térmica:** El principal desafío térmico de la IPU no es la magnitud de la carga de calor promedio, sino su naturaleza **pulsada y de alto flujo**. Esto exige soluciones de refrigeración con una excelente respuesta transitoria, además de una baja resistencia térmica en estado estacionario.
2. **Viabilidad de la Transferencia de Calor Bifásica:** Se ha determinado que las **cámaras de vapor** son la tecnología más adecuada para la interfaz inicial con la fuente de calor (el lado caliente de un TEC). Su capacidad para esparcir de manera eficiente y uniforme un alto flujo de calor sobre una gran superficie las convierte en una solución superior a los tubos de calor para esta aplicación específica.
3. **Potencial de Recuperación de Energía con TEG:** Es factible integrar una matriz de TEGs para recuperar una parte del calor residual. Las estimaciones de modelado sugieren que se podría generar una potencia eléctrica modesta, en el rango de **5 a 15 W**, dependiendo de la diferencia de temperatura final lograda a través de la matriz.
4. **Compromiso Fundamental de Diseño:** La integración de TEGs introduce una **resistencia térmica adicional significativa** en la ruta de disipación de calor primaria. Esto crea un compromiso ineludible entre maximizar el rendimiento de la refrigeración (minimizando la temperatura de los componentes) y maximizar la recuperación de energía (maximizando la diferencia de temperatura a través de los TEGs).
5. **Necesidad de un Enfoque de Sistema:** El diseño del sistema de gestión térmica no puede aislarse del diseño del sistema de control de la IPU. Se han identificado dos interdependencias críticas: la necesidad de un **modo de "calentamiento"** para arranques en frío debido a las limitaciones de temperatura del fluido de trabajo de la cámara de vapor, y la posibilidad de un **control de potencia "consciente de la temperatura"** para evitar el sobrecalentamiento durante picos de carga.

## 7.2. Recomendación Final sobre la Estrategia Óptima de Gestión Térmica

No existe una única solución "óptima" que satisfaga todos los objetivos simultáneamente. La elección de la arquitectura de gestión térmica debe basarse en las prioridades de la misión y los objetivos de coste del proyecto IPU. Por lo tanto, se presenta una recomendación escalonada:

- **Recomendación para Máxima Fiabilidad y Rendimiento de Refrigeración:**  
Si el objetivo principal es garantizar la máxima fiabilidad de los componentes, los márgenes de seguridad más amplios y el mayor potencial de rendimiento de la IPU (permitiendo mayores potencias o frecuencias de pulso), la solución recomendada es una cámara de vapor acoplada directamente a una placa fría de refrigeración líquida por microcanales. Esta arquitectura ofrece la menor resistencia térmica posible y la mejor respuesta transitoria, aunque con un mayor coste inicial y complejidad del sistema.
- **Recomendación para Eficiencia y Resiliencia Mejoradas:**  
Si se puede aceptar un ligero compromiso en el rendimiento máximo de refrigeración a cambio de una mayor eficiencia energética global y una mayor resiliencia del sistema, el sistema híbrido de Cámara de Vapor + Matriz de TEG + Disipador de Aire Forzado de alto rendimiento es una opción viable. El valor de la energía recuperada, especialmente en aplicaciones autónomas o fuera de la red, puede justificar la mayor complejidad y el coste adicional del subsistema TEG.

La siguiente tabla resume la comparación entre las dos opciones recomendadas para facilitar la toma de decisiones.

**Tabla 7.1: Cuadro de Mando Comparativo Final de las Soluciones Térmicas**

Métrica de Rendimiento	Opción A: Cámara de Vapor + Refrigeración Líquida	Opción B: Cámara de Vapor + TEG + Refrigeración por Aire
<b>Resistencia Térmica Total (Unión-Ambiente)</b>	Muy Baja	Moderada
<b>Temperatura de Unión de Pico (<math>T_{j,pico}</math>)</b>	La más baja posible	Moderada (más alta que la Opción A)
<b>Consumo/Recuperación de Energía Neta</b>	Consumo neto (bomba)	Consumo neto (ventilador), parcialmente compensado por la recuperación de TEG
<b>Coste Estimado del BOM</b>	Alto	Moderado-Alto
<b>Complejidad del Sistema</b>	Alta (bucle de líquido, bomba, radiador)	Muy Alta (matriz de TEG, TIMs múltiples, acondicionamiento de potencia para TEG)
<b>Fiabilidad/MTBF Estimado</b>	Alta (menos interfaces)	Moderada (más componentes y puntos de fallo potenciales)

### 7.3. Trabajo Futuro y Optimizaciones Potenciales

Para avanzar en el desarrollo de la solución de gestión térmica para la IPU, se recomiendan las siguientes áreas de investigación y desarrollo:

1. **Prototipado y Validación Experimental:** Construir y probar prototipos físicos de ambas arquitecturas recomendadas para validar los modelos térmicos y cuantificar con

precisión el rendimiento en condiciones de carga pulsada reales.

2. **Desarrollo de un Algoritmo de Control "Consciente de la Temperatura":** Integrar sensores de temperatura en puntos clave del apilamiento térmico y desarrollar un bucle de control en el firmware de la IPU que pueda modular dinámicamente la potencia de salida o la frecuencia de los pulsos para evitar exceder los límites térmicos durante condiciones operativas extremas o de fallo parcial del sistema de refrigeración.
3. **Investigación de Materiales de Cambio de Fase (PCM):** Explorar la integración de Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la base del disipador de calor final. Los PCMs pueden actuar como un búfer térmico, absorbiendo el calor latente durante los picos de pulso y liberándolo lentamente durante los períodos de baja carga, lo que podría reducir aún más la amplitud de la oscilación de la temperatura de la unión.<sup>62</sup>
4. **Optimización de la Matriz de TEG:** Realizar un estudio detallado para optimizar la configuración serie-paralelo de la matriz de TEG, considerando la distribución de temperatura real en la superficie de la cámara de vapor para maximizar la potencia de salida. Investigar la viabilidad de una matriz reconfigurable para adaptarse a diferentes perfiles de carga de la IPU.

## Obras citadas

1. Panel\_IPU\_3.pdf
2. Discrete Silicon Carbide (SiC) MOSFETs - Wolfspeed, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.wolfspeed.com/products/power/sic-mosfets/>
3. 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>
4. 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>
5. What Is Design for Reliability (DfR)? | Ansys Blog, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.ansys.com/blog/the-what-why-when-who-and-how-of-design-for-reliability>
6. Design for Reliability of Electronics – 5 Practical Steps - Titoma, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://titoma.com/blog/design-reliability-electronics/>
7. 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](https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/PDFs/Resources/ResourcesElectStressDeratingAnalysis.pdf)
8. Derating - Quanterion Solutions Incorporated, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.quanterion.com/derating/>
9. The Basics of Derating Electronic Components - Accendo Reliability, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://accendoreliability.com/basics-derating-electronic-components/>
10. Understanding Power Derating - Astrodyne TDI, fecha de acceso: junio 29, 2025,



- <https://www.astrodynetdi.com/blog/understanding-power-derating>
11. Reliability and failure analysis of DC/DC converter and case studies - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/261456579\\_Reliability\\_and\\_failure\\_analysis\\_of\\_DCDC\\_converter\\_and\\_case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/261456579_Reliability_and_failure_analysis_of_DCDC_converter_and_case_studies)
  12. Reliability issues in GaN and SiC power devices - ResearchGate, fecha de acceso: junio 29, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/269292964\\_Reliability\\_issues\\_in\\_GaN\\_and\\_SiC\\_power\\_devices](https://www.researchgate.net/publication/269292964_Reliability_issues_in_GaN_and_SiC_power_devices)
  13. Heat pipe - Wikipedia, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_pipe](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pipe)
  14. Heat Pipe Learning Center - Everything You Need To Know About Heat Pipes, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.1-act.com/resources/learning-center/heat-pipes/>
  15. The Basics of Heat Pipes – Their History, Principle, and Varieties explained, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.global.dnp.biz/column/detail/10162360\\_4117.html](https://www.global.dnp.biz/column/detail/10162360_4117.html)
  16. www.reddit.com, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.reddit.com/r/engineering/comments/18gphev/in\\_need\\_of\\_a\\_lesson\\_on\\_heat\\_pipes/#:~:text=Heat%20pipes%20work%20using%20,does%20it%20all%20over%20again.](https://www.reddit.com/r/engineering/comments/18gphev/in_need_of_a_lesson_on_heat_pipes/#:~:text=Heat%20pipes%20work%20using%20,does%20it%20all%20over%20again.)
  17. About Phase Change Cooling A Two-Phase Heat Transfer Technology - Baknor Thermal Management, Heat Sinks, Liquid Cold Plates & More., fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.baknorthermal.com/about-phase-change-cooling/>
  18. www.tglobalcorp.com, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.tglobalcorp.com/news/blog/heat-pipe-thermal-conductivity/#:~:text=Differences%20in%20Solid%20Metal%20vs%20Heat%20Pipe%20Thermal%20Conductivity&text=Pure%20copper%20for%20its%20thermal,m%C2%B7K%20under%20ideal%20conditions.>
  19. Heat Pipe Thermal Conductivity | Celsia, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://celsiainc.com/heat-sink-blog/heat-pipe-thermal-conductivity/>
  20. Design Considerations When Using Heat Pipes | Electronics Cooling, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.electronics-cooling.com/2016/08/design-considerations-when-using-heat-pipes/>
  21. UNDERSTANDING HEAT PIPE THERMAL CONDUCTIVITY - KTK Thermal Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.ktkthermal.com/understanding-heat-pipe-thermal-conductivity/>
  22. Understanding Heat Pipe Thermal Conductivity - Celsia Inc., fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://celsiainc.com/heat-sink-tech-tips/heat-pipe-thermal-conductivity/>
  23. HEAT PIPES - Thermopedia, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.thermopedia.com/content/835/>
  24. Heat Pipes - Part III Operating principles: heat transfer limits - UNILAB Srl, fecha de acceso: junio 30, 2025,

<https://www.unilab.eu/articles/technical-articles/thermodynamic-engineering-articles/heat-pipes-pt-3/>

25. Heat Pipe Design Guide - Advanced Cooling Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.1-act.com/thermal-solutions/passive/heat-pipes/heat-pipe-design-guide/>
26. Volume 2: Heat Pipe Operating Limits - YouTube, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=GHTeKHKkItA>
27. Sonic Limitations and Startup Problems of Heat Pipes - OSTI.GOV, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.osti.gov/servlets/purl/4090829>
28. Heat pipes and vapor chambers: how do they work and what's the difference? - Intergalactic, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://ig.space/commslink/heat-pipes-vapor-chambers-whats-the-difference/>
29. ig.space, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://ig.space/commslink/heat-pipes-vapor-chambers-whats-the-difference/#:~:text=Heat%20pipes%20are%20simpler%20in,shedding%20larger%20amounts%20of%20heat\).](https://ig.space/commslink/heat-pipes-vapor-chambers-whats-the-difference/#:~:text=Heat%20pipes%20are%20simpler%20in,shedding%20larger%20amounts%20of%20heat).)
30. Heat Pipe vs Vapor Chamber: What's the Difference in Performance and Applications?Enner, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.ennergroupp.com/news/heat-pipe-vs-vapor-chamber-whats-the-difference-in-performance-and-applications.html>
31. Heat Pipes vs. Vapor Chambers | Column | Solutions/Products ..., fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.global.dnp/biz/column/detail/10162048\\_4117.html](https://www.global.dnp/biz/column/detail/10162048_4117.html)
32. Heat pipe vs vapor chamber - advantages, disadvantages and application areas revealed, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.ennergroupp.com/news/heat-pipe-vs-vapor-chamber-advantages-disadvantages-and-application-areas-revealed.html>
33. Heat Pipes & Vapor Chambers - Radian Thermal Products, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://radianheatsinks.com/wp-content/uploads/2017/07/Heat-Pipes-and-Vapor-Chambers.pdf>
34. Thermoelectric generator - Wikipedia, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator)
35. Seebeck effect - BYJU'S, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://byjus.com/physics/seebeck-effect/>
36. Thermoelectric power generator - Heat, Electricity, Conversion | Britannica, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.britannica.com/technology/thermoelectric-power-generator/Principles-of-operation>
37. Explained: Thermoelectricity | MIT News | Massachusetts Institute of Technology, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://news.mit.edu/2010/explained-thermoelectricity-0427>
38. How Thermoelectric Generators Work, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-generators-work/>
39. Typical thermoelectric generator with a Series-Parallel arrangement of modules,

- fecha de acceso: junio 30, 2025,  
[https://www.researchgate.net/figure/Typical-thermoelectric-generator-with-a-Series-Parallel-arrangement-of-modules\\_fig5\\_339143385](https://www.researchgate.net/figure/Typical-thermoelectric-generator-with-a-Series-Parallel-arrangement-of-modules_fig5_339143385)
40. Study of TEG When Connected in Series and Parallel Combinations Along With a DC-DC Converter, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
[http://182.71.247.84/assoc\\_art/images/paper/1673421271Ch\\_8.pdf](http://182.71.247.84/assoc_art/images/paper/1673421271Ch_8.pdf)
  41. Teg Datasheet | PDF | Manufactured Goods | Electromagnetism - Scribd, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://www.scribd.com/document/683720758/TEG-DATASHEET>
  42. Power Generation Thermoelectric Modules (TEG) - JARO Thermal, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://jarothermal.com/products/tec/power-generation/power-generation-thermoelectric-modules-teg/>
  43. 10-Watt TEG Module, 4V Output, 40mm Square - TEGmart, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://www.tegmart.com/thermoelectric-modules/10w-teg-module>
  44. 1-Watt TEG Module, 2V Output, 21mm Square - TEGmart, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://www.tegmart.com/thermoelectric-modules/1w-2v-21m-teg-module>
  45. TEG1-24111-6.0 - Thermoelectric Generator, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://thermoelectric-generator.com/product/teg1-24111-6-0/>
  46. 19W TEG Module - By TEGpro - TEGmart, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://www.tegmart.com/thermoelectric-modules/19w-teg-module>
  47. TEG Specification Sheet 1261G-7L31-24CX1 Seebeck Thermoelectric Generator, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
[https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEG\\_spec\\_sheets/1261G-7L31-24CX1\\_20140328\\_spec\\_sht.pdf](https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEG_spec_sheets/1261G-7L31-24CX1_20140328_spec_sht.pdf)
  48. TEG2-126LDT - Thermoelectric Generator, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2023/10/TEG2-126LDT-Spec.-sheet.1.1.pdf>
  49. (a) Schematic sandwich diagram of TEG; (b) thermal resistance network... - ResearchGate, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
[https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-sandwich-diagram-of-TEG-b-thermal-resistance-network-for-TEG\\_fig1\\_328180105](https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-sandwich-diagram-of-TEG-b-thermal-resistance-network-for-TEG_fig1_328180105)
  50. Analysis Of Power Characteristics Of Model Thermoelectric Generator (TEG) Small Modular, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://www.ijstr.org/final-print/apr2017/Analysis-Of-Power-Characteristics-Of-Model-Thermoelectric-Generator-teg-Small-Modular.pdf>
  51. Reconfigurable Thermoelectric Generators for Vehicle Radiators Energy Harvesting - Yanzhi Wang, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://ywang393.expressions.syr.edu/wp-content/uploads/2016/07/Reconfigurable-thermoelectric-generators-for-vehicle-radiators-energy-harvesting.pdf>
  52. TEG in series require power balancer/align adapter? - Electronics Stack Exchange, fecha de acceso: junio 30, 2025,  
<https://electronics.stackexchange.com/questions/26625/teg-in-series-require-po>

[wer-balancer-align-adapter](#)

53. Series/Parallel Switching for Increasing Power Extraction from Thermoelectric Power Generators - MDPI, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/8/1015>
54. Principle and Applications of Thermoelectric Generators: A Review - PMC, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12031398/>
55. Theoretical analysis of thermoelectric module, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://wjaets.com/sites/default/files/WJAETS-2023-0025.pdf>
56. Experimental Study on Thermal Contact Resistance of Thermoelectric Generators - AIP Publishing, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/5.0117221/16231479/020060\\_1\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/5.0117221/16231479/020060_1_online.pdf)
57. Thermal effect of a thermoelectric generator on parallel microchannel heat sink | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/257176392\\_Thermal\\_effect\\_of\\_a\\_thermoelectric\\_generator\\_on\\_parallel\\_microchannel\\_heat\\_sink](https://www.researchgate.net/publication/257176392_Thermal_effect_of_a_thermoelectric_generator_on_parallel_microchannel_heat_sink)
58. Optimization of Heat Sink Geometry for Improved Thermoelectric Generator Efficiency - IJETA, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.ijeta.org/download/file/fid/122813>
59. Effect of Different Heat Sink Designs on Thermoelectric Generator System Performance in a Turbocharged Tractor - MDPI, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3267>
60. Optimization of thermoelectric systems for maximum power generation based on heat-source and heat-sink conditions - AIP Publishing, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/jap/article/136/15/155002/3317330/Optimization-of-thermoelectric-systems-for-maximum>
61. Design of heat sink for improving the performance of thermoelectric generator using two-stage optimization - IDEAS/RePEc, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v39y2012i1p236-245.html>
62. A Comparative Study of Thermal Management Strategies for Overcurrent in Aircraft Power Electronics Applications | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/391065532\\_A\\_Comparative\\_Study\\_of\\_Thermal\\_Management\\_Strategies\\_for\\_Overcurrent\\_in\\_Aircraft\\_Power\\_Electronics\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/391065532_A_Comparative_Study_of_Thermal_Management_Strategies_for_Overcurrent_in_Aircraft_Power_Electronics_Applications)
63. System-Level Metrics for Thermal Management Technology | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/287111419\\_System-Level\\_Metrics\\_for\\_Thermal\\_Management\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/287111419_System-Level_Metrics_for_Thermal_Management_Technology)
64. A Thermal Management Strategy for Inverter System Based on Predictive Control - IJETA, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.ijeta.org/download/file/fid/92465>
65. Advanced Thermal Management Design Boosts Performance of Silicon Carbide Inverters for Heavy-Duty Vehicles | NREL, fecha de acceso: junio 30, 2025,

<https://www.nrel.gov/news/detail/features/2021/advanced-thermal-management-design-boosts-performance-of-silicon-carbide-inverters-for-heavy-duty-vehicles>

66. Device- and System-Level Thermal Packaging for Electric-Drive Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/06/f75/elt251\\_joshi\\_2020\\_p\\_4.27.20\\_421PM\\_%20TM.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/06/f75/elt251_joshi_2020_p_4.27.20_421PM_%20TM.pdf)
67. Power Electronics Thermal Management Research. Annual Progress Report - Publications, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://docs.nrel.gov/docs/fy18osti/67112.pdf>
68. Device- and System-Level Thermal Packaging for Electric-Drive Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-07/elt251\\_joshi\\_2021\\_p\\_5-13\\_347pm\\_KF\\_ML.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-07/elt251_joshi_2021_p_5-13_347pm_KF_ML.pdf)
69. Comparison of Thermal Management Approaches for Integrated Traction Drives in Electric Vehicles - Publications, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/77160.pdf>
70. P16/300B CMT | Heatsink, SEMIPACK, SEMIPONT, SEMITRANS ..., fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://uk.rs-online.com/web/p/heatsinks/1336335>
71. SKF 16B-230-01 SEMIKRON DANFOSS - Fan: AC | blower; 230VAC - TME.eu., fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.tme.com/us/en-us/details/skf16b-230-01/ac230v-fans/semikron-danfos/skf-16b-230-01/>
72. SEMIKRON SKF16B-230-01 (art. 30119362) AC Radial Fan | ELTRA TRADE, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://eltra-trade.com/products/semikron-skf16b-230-01-art-30119362>
73. IGBT Liquid Cooling Solutions | Mikros Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mikrostechnologies.com/microchannel-liquid-cooling/applications/renewable-energy/>
74. IGBT Liquid Cooling All You Need to Know - KingKa Tech, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.kingkatech.com/igbt-liquid-cooling-all-you-need-to-know.html>
75. All You Need to Know About IGBT Liquid Cooling - KenFa Tech, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.kenfatech.com/all-you-need-to-know-about-igbt-liquid-cooling/>
76. Microchannel Liquid Cooling Overview - Mikros Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mikrostechnologies.com/microchannel-liquid-cooling/>
77. Microchannel Cold Plate - Trumonytechs, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.trumonytechs.com/microchannel-cold-plate-overview/>
78. Cooling-High-Heat-Flux-Devices-With-Mikros-Microchannel-Cold-Plates.pdf, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mikrostechnologies.com/wp-content/uploads/2020/12/Cooling-High-Heat-Flux-Devices-With-Mikros-Microchannel-Cold-Plates.pdf>



79. High-Performance Cold Plates & Thermal Solutions - Advanced Cooling Technologies, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.1-act.com/thermal-solutions/passive/custom-cold-plates/>
80. Tag Archives: Microchannel Cold Plates - Advanced Thermal Solutions, Inc., fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.qats.com/cms/tag/microchannel-cold-plates/>
81. Transient Analysis of Microchannel Heat Sink during Single Phase and Flow Boiling Conditions | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/289556347\\_Transient\\_Analysis\\_of\\_Microchannel\\_Heat\\_Sink\\_during\\_Single\\_Phase\\_and\\_Flow\\_Boiling\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/289556347_Transient_Analysis_of_Microchannel_Heat_Sink_during_Single_Phase_and_Flow_Boiling_Conditions)
82. Transient Cooling of Millisecond-Pulsed Heat Sources by a Jet Impingement Heat Sink with Metallic Phase Change Material - MDPI, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1812>
83. (PDF) Transient thermal behavior of a microchannel heat sink with multiple impinging jets, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/283849316\\_Transient\\_thermal\\_behavior\\_of\\_a\\_microchannel\\_heat\\_sink\\_with\\_multiple\\_impinging\\_jets](https://www.researchgate.net/publication/283849316_Transient_thermal_behavior_of_a_microchannel_heat_sink_with_multiple_impinging_jets)
84. MODELING TRANSIENT THERMAL RESPONSE OF PULSED POWER ELECTRONIC PACKAGES - DTIC, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA609185.pdf>
85. Microchannel Heat Sinks—A Comprehensive Review - MDPI, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mdpi.com/2673-3978/5/4/17>
86. FLUID & THERMAL ANALYSIS OF A MANIFOLD MICROCHANNEL HEAT SINK, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240009781/downloads/TFAWS%202024%20Paper%20Wilhite.pdf>
87. Heat Pipes vs. Liquid Channels: A Detailed Comparison of Heat Dissipation Pipe Design, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.kingkatech.com/heat-pipes-vs-liquid-channels-a-detailed-comparison-of-heat-dissipation-pipe-design.html>
88. Heat Pipe Dryout and Temperature Hysteresis in Response to Transient Heat Pulses Exceeding the Capillary Limit - Purdue e-Pubs, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1351&context=coolingpubs>
89. (PDF) Modeling transient thermal response of pulsed power electronic packages, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/261023463\\_Modeling\\_transient\\_thermal\\_response\\_of\\_pulsed\\_power\\_electronic\\_packages](https://www.researchgate.net/publication/261023463_Modeling_transient_thermal_response_of_pulsed_power_electronic_packages)
90. Heat pipes vs fluid cooling - Engineering Stack Exchange, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://engineering.stackexchange.com/questions/7718/heat-pipes-vs-fluid-cooling>
91. (PDF) Transient thermal performance modeling and experimentation of heat pipes for high power electronics cooling - ResearchGate, fecha de acceso: junio

- 30, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/285994602\\_Transient\\_thermal\\_performance\\_modeling\\_and\\_experimentation\\_of\\_heat\\_pipes\\_for\\_high\\_power\\_electronics\\_cooling](https://www.researchgate.net/publication/285994602_Transient_thermal_performance_modeling_and_experimentation_of_heat_pipes_for_high_power_electronics_cooling)
92. Review on Research Progress of Pulsating Heat Pipes - MDPI, fecha de acceso: junio 30, 2025, <https://www.mdpi.com/2411-5134/9/4/86>
93. CHARACTERIZATION AND MECHANISTIC PREDICTION OF HEAT PIPE PERFORMANCE UNDER TRANSIENT OPERATION AND DRYOUT CONDITIONS, fecha de acceso: junio 30, 2025, [https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/strong\\_CHARACTERIZATION\\_AND\\_MECHANISTIC\\_PREDICTION\\_OF\\_HEAT\\_PIPE\\_PERFORMANCE\\_UNDER\\_TRANSIENT\\_OPERATION\\_AND\\_DRYOUT\\_CONDITIONS\\_strong\\_/23740662](https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/strong_CHARACTERIZATION_AND_MECHANISTIC_PREDICTION_OF_HEAT_PIPE_PERFORMANCE_UNDER_TRANSIENT_OPERATION_AND_DRYOUT_CONDITIONS_strong_/23740662)
94. Semikron Blower SKF16A-230-01, fecha de acceso: junio 29, 2025, [https://semic.cz/old/files/pdf\\_www/V\\_SKF16A-230-01.pdf](https://semic.cz/old/files/pdf_www/V_SKF16A-230-01.pdf)
95. Peak Shaving Strategies: Using Advanced Generator and Storage Technology to Manage Demand - Energy Central, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.energycentral.com/energy-management/post/peak-shaving-strategies-using-advanced-generator-and-storage-technology-XT30UnP1tGgSq5Z>
96. What does Peak shaving mean? - Next Kraftwerke, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-is-peak-shaving>
97. Peak shaving: Everything you need to know - gridX, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.gridx.ai/knowledge/peak-shaving>
98. 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)
99. What is FMEA? Failure Mode & Effects Analysis - ASQ, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://asq.org/quality-resources/fmea>
100. Understanding Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Crucial Step in Engineering Excellence - Fresh Consulting, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.freshconsulting.com/insights/blog/understanding-failure-mode-and-effects-analysis-fmea-a-crucial-step-in-engineering-excellence/>
101. Microgrid Market Size, Share & Growth Analysis Report 2030 - Grand View Research, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microgrid-market>
102. Microgrid Market Size, Share and Growth Analysis - MarketsandMarkets, fecha de acceso: junio 29, 2025, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/micro-grid-electronics-market-917.html>