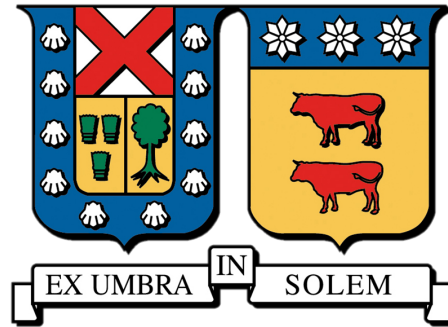




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN TÉRMICA PARA LA EVALUACIÓN Y
OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EN
INVERSORES FOTOVOLTAICOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

FRANCISCO ARDILES DÍAZ

PROFESOR GUÍA

FELIPE ESCUDERO BARROS

PROFESOR CO-REFERENTE

RODRIGO DEMARCO BULL

VALPARAÍSO, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis Y Simulación Térmica Para La Evaluación Y Optimización De Sistemas De Enfriamiento En Inversores Fotovoltaicos.

Nombre del candidato(a): Francisco Eduardo Ardiles Díaz

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Campus Casa Central Valparaíso **Departamento:** Departamento de Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Escudero Barros, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/09/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-06-2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Tabla de Contenidos

1	Resumen Ejecutivo	4
2	Problema de Investigación	6
3	Objetivos	9
3.1	Objetivo General	9
3.2	Objetivos Específicos	9
4	Marco Teórico	10
4.1	Sistemas de conversión de energía fotovoltaica	10
4.1.1	Fundamentos de la generación fotovoltaica	10
4.1.2	Arquitectura de inversores de cadena (<i>String Inverters</i>)	11
4.1.3	Semiconductores de potencia (IGBT)	12
4.1.4	Generación de calor: Pérdidas por conducción y conmutación	13
4.2	Impacto térmico en la operación de inversores	15
4.2.1	Mecanismo de autoprotección: <i>Thermal Derating</i>	15
4.2.2	Degradación termomecánica y estimación de vida útil	16
4.2.3	Impacto en la eficiencia de conversión	18
4.3	Fundamentos de transferencia de calor	19
4.3.1	Conducción térmica en materiales sólidos	20
4.3.2	Convección térmica (Natural y Forzada)	21
4.3.3	Radiación térmica en componentes electrónicos	23
4.4	Modelación y simulación térmica computacional	24

4.4.1	Métodos numéricos en transferencia de calor	24
4.4.2	Simulación en régimen bidimensional (2D)	25
4.4.3	Sistemas de disipación por aire	26
4.4.4	Implementación computacional y estabilidad del esquema temporal	27
4.4.5	Estado del Arte en Estrategias de Enfriamiento de Inversores	28
4.5	Modelamiento de Perfiles Solares y Condiciones Ambientales	29
4.6	Evaluación económica	30
4.6.1	Estructura de costos: CAPEX y OPEX	30
5	Metodología	32
5.1	Definición del caso de estudio y caracterización física	33
5.1.1	Asignación de propiedades termofísicas	34
5.1.2	Dominio espacial y discretización de la malla (2D)	34
5.1.3	Hipótesis y supuestos del modelo	37
5.2	Modelamiento del entorno operativo y perfiles térmicos	38
5.2.1	Perfil solar y generación térmica dinámica	38
5.2.2	Cálculo de sombreado y factores de forma	39
5.3	Formulación del modelo térmico mediante MVF	40
5.3.1	Balance energético nodal	41
5.3.2	Dominio espacial y discretización de la malla (2D)	41
5.3.3	Tratamiento del coeficiente de convección (h)	43
5.3.4	Implementación de la Media Armónica en interfaces	44
5.3.5	Estabilidad numérica	44

5.4	Estrategia de control de refrigeración activa	45
5.4.1	Diseño del sistema de refrigeración activa	47
5.4.2	Estrategia de control y realimentación (Sensor PT100)	47
5.4.3	Ley de control proporcional (PWM) y acoplamiento térmico	48
5.5	Validación del modelo numérico	49
5.6	Metodología de evaluación económica	50
5.7	Definición del modelo de costos	50
6	Resultados	51
6.1	Diagnóstico térmico del escenario base (Configuración pasiva)	51
6.2	Evolución temporal y aparición del <i>derating</i>	52
6.3	Validación cuantitativa del campo térmico	55
6.4	Validación física de la pérdida de inyección de potencia	56
6.5	Validación empírica mediante curvas de <i>derating</i>	57
6.6	Resultados del sistema de enfriamiento activo	59
6.7	Estabilización térmica y mitigación del <i>derating</i>	60
6.8	Resultados del sistema de refrigeración activa	61
6.9	Evaluación económica de la solución	62
6.10	Estructura de costos estimada	62
6.11	Balance energético diario	63
6.12	Beneficio económico marginal	63
7	Conclusiones	65

1 Resumen Ejecutivo

El presente trabajo de memoria aborda la degradación del rendimiento en inversores fotovoltaicos de cadena (*string inverters*) causada por el fenómeno de *thermal derating* (reducción térmica de potencia). En entornos de alta radiación y condiciones de montaje con ventilación restringida, se identificó que los inversores operan frecuentemente bajo umbrales críticos de temperatura, provocando pérdidas energéticas significativas.

Mediante la implementación de un modelo de simulación numérica basado en el Método de Volúmenes Finitos (MVF), esta investigación caracteriza la dinámica térmica interna de un inversor. Se diagnosticó que el sistema de disipación pasiva original es insuficiente en condiciones estivales, resultando en una ineficiencia energética diaria del 20,48 % debida a la restricción algorítmica de potencia.

Como solución, se diseña e integra un módulo de enfriamiento activo compacto, caracterizado por un flujo de aire forzado mediante ventilación IP68 y una estrategia de control proporcional PWM basada en realimentación térmica (PT100). Los resultados demuestran que la implementación de este *retrofit* permite:

- **Recuperar el 100 % de la energía inyectable**, eliminando totalmente las mermas por *thermal derating* en condiciones críticas.
- **Reducir la temperatura operativa de los semiconductores en 32.8 °C**, estabilizando el equipo en un régimen térmico óptimo de 72 °C.
- **Garantizar la rentabilidad operativa**, con una inversión de bajo impacto (CAPEX estimado de 400 USD) que optimiza directamente la disponibilidad del activo.

Este trabajo concluye que la optimización térmica mediante módulos activos no solo es una necesidad técnica para mitigar la ineficiencia, sino una estrategia de gestión de activos de alta rentabilidad que asegura el retorno económico de la planta fotovoltaica.

2 Problema de Investigación

La energía solar fotovoltaica es una de las principales fuentes de energía renovable a nivel global, presentando un crecimiento sostenido durante las últimas décadas (International Energy Agency, 2024). En los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, los inversores son componentes esenciales, ya que son los encargados de convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA) utilizable por la red eléctrica o los usuarios finales. Para lograr esto, los inversores modernos incorporan técnicas de modulación y control que buscan maximizar la eficiencia, reducir las pérdidas y garantizar la calidad de la energía (Ali Khan et al., 2020).

Sin embargo, el proceso de conversión de energía no es ideal. Para transformar la CC en CA, el inversor utiliza semiconductores de potencia, principalmente Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBT). Estos componentes operan mediante conmutación a alta frecuencia, lo que genera inevitables pérdidas de potencia que se disipan internamente en forma de calor. Físicamente, estas pérdidas se producen por dos vías: por *conducción*, debido a la resistencia interna del material mientras permite el flujo continuo de energía; y por *conmutación*, originadas por la superposición momentánea de voltaje y corriente cada vez que el semiconductor transita entre sus estados de encendido y apagado. Este sobrecalentamiento localizado representa uno de los problemas técnicos más críticos. Para proteger la integridad de los componentes, los inversores activan un mecanismo de autoprotección denominado *thermal derating* (reducción térmica de potencia), el cual disminuye intencionalmente la potencia de salida del equipo cuando la temperatura interna supera un umbral crítico (Rahman et al., 2024). Aunque esto evita fallas catastróficas inmediatas, genera caídas drásticas en la eficiencia global de la planta. A largo plazo, el estrés térmico acelera

la degradación termomecánica de los encapsulados; la física de falla de estos semiconductores está gobernada por la ley de Arrhenius, la cual establece una relación exponencial entre la temperatura de unión (T_j) y la tasa de falla del componente. Estudios sobre confiabilidad en electrónica de potencia demuestran que incrementos sostenidos en la temperatura de operación aceleran mecanismos de fatiga térmica y electromigración, reduciendo exponencialmente la vida útil del dispositivo (Blaabjerg et al., 2014). Por ello, una gestión térmica precisa es imperativa para evitar la degradación prematura y asegurar la continuidad operativa del inversor (Wang et al., 2025).

A nivel operativo, el impacto de este sobrecalentamiento es particularmente crítico en los inversores de cadena (*string inverters*) conectados a la red. A diferencia de las topologías centralizadas, donde un único inversor de gran envergadura procesa la energía de toda la planta, la arquitectura de cadena agrupa los paneles solares en series independientes que se conectan a su propio inversor dedicado (Kjaer et al., 2005). Esta configuración distribuida optimiza la recolección de energía al independizar las fallas o sombreados parciales, además de ser mucho más eficientes en términos de costos en instalaciones de pequeña y mediana escala. Sin embargo, al ser equipos más compactos e instalados directamente en las estructuras de montaje, las restricciones de espacio físico y los requerimientos de bajo mantenimiento obligan a la industria a priorizar sistemas de enfriamiento basados exclusivamente en arreglos de disipación y flujo de aire. El verdadero desafío de la ingeniería radica en optimizar estratégicamente estos sistemas para que logren disipar eficientemente las altas densidades de calor, sin incurrir en rediseños físicos costosos ni paradas operativas que impacten negativamente el Costo Nivelado de la Energía (LCOE) (Pathak et al., 2022).

Ante la dificultad técnica y el alto costo financiero de realizar pruebas empíricas destructivas en terreno, existe una brecha en la capacidad de evaluar proactivamente nuevas estrategias

de enfriamiento. Se hace indispensable comprender en detalle la dinámica de los flujos de calor originados en los semiconductores y su impacto directo en las mermas de eficiencia. Abordar este vacío de conocimiento se justifica por su alto valor teórico y práctico, ya que responder a esta problemática permitirá a la industria tomar decisiones informadas y económicamente viables sobre qué alternativas de disipación térmica implementar para mitigar el *thermal derating* y extender la vida útil de los equipos, minimizando el riesgo de la inversión.

A partir de la problemática expuesta, y considerando la necesidad de establecer relaciones medibles entre las variables térmicas y económicas, surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo afecta el aumento de la temperatura de operación a la eficiencia de conversión y a la vida útil de los inversores fotovoltaicos de cadena?
- ¿Cuál es la dinámica de transferencia de calor al interior del equipo cuando es sometido a estrategias de disipación por aire?
- Ante las limitaciones de la experimentación empírica, ¿de qué manera se puede evaluar y predecir confiablemente el comportamiento térmico de estos equipos?
- Considerando el comportamiento térmico, ¿es técnica y económicamente viable la optimización de los sistemas de enfriamiento en un escenario industrial?

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnico-económica de una propuesta de optimización térmica para inversores fotovoltaicos de cadena, mediante la modelación y simulación térmica predictiva de sus flujos de calor, para mitigar el *thermal derating* y maximizar la rentabilidad operativa de los equipos.

3.2 Objetivos Específicos

1. Cuantificar el impacto de la temperatura de operación sobre la eficiencia de conversión y la degradación de los semiconductores de potencia, para establecer los umbrales críticos que afectan el rendimiento del sistema.
2. Desarrollar un modelo de simulación predictivo, para caracterizar la dinámica de transferencia de calor al interior del equipo frente a la inviabilidad de realizar experimentación física.
3. Evaluar el desempeño de la optimización térmica propuesta bajo diversos escenarios operativos y perfiles de generación solar, para validar su capacidad de estabilización de temperatura frente a condiciones variables.
4. Determinar la rentabilidad de la estrategia térmica mediante indicadores económicos de evaluación de proyectos, para fundamentar su factibilidad de implementación a nivel industrial.

4 Marco Teórico

4.1 Sistemas de conversión de energía fotovoltaica

La integración de la energía solar fotovoltaica a la matriz eléctrica presenta un desafío técnico fundamental: los paneles solares generan electricidad en forma de corriente continua (CC), mientras que la infraestructura de transmisión, distribución y consumo opera de manera estandarizada en corriente alterna (CA).

Para resolver esta incompatibilidad geométrica y operativa, los sistemas fotovoltaicos emplean etapas de acondicionamiento donde el inversor actúa como el núcleo tecnológico. A través de componentes de electrónica de potencia avanzada, este equipo no solo ejecuta la conversión de CC a CA, sino que también optimiza la extracción de energía del arreglo solar y asegura que la potencia inyectada cumpla con los estándares de estabilidad de la red.

A continuación, se describen los principios operativos de esta tecnología, enfocándose en la arquitectura predominante de los inversores comerciales y el rol crítico de los semiconductores de potencia. Comprender estos elementos es esencial para el desarrollo de esta investigación, ya que el proceso de conmutación eléctrica no es ideal; las inevitables ineficiencias operativas de los componentes se manifiestan directamente como calor disipado. Esta generación de calor constituye el origen físico del problema térmico que se modelará en los apartados posteriores.

4.1.1. Fundamentos de la generación fotovoltaica

La generación de energía solar fotovoltaica se basa en la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de arreglos semiconductores. Una característica inherente a esta tecnología es que la totalidad de la energía generada en el campo solar se entrega

estrictamente bajo la forma de Corriente Continua (CC) (Smets et al., 2016).

Dada la baja capacidad unitaria de las celdas individuales, estas se agrupan en módulos y arreglos a gran escala para alcanzar los volúmenes de potencia que exigen las aplicaciones industriales (Parida et al., 2011). Sin embargo, dado que el sistema de transmisión eléctrico y la mayoría de los equipos de consumo operan bajo el estándar de Corriente Alterna (CA), la energía capturada no puede inyectarse directamente a la red. Esta incompatibilidad hace estrictamente necesaria la implementación de una etapa intermedia de conversión de potencia, convirtiendo al inversor fotovoltaico en el eslabón crítico que viabiliza operativamente la planta.

4.1.2. Arquitectura de inversores de cadena (*String Inverters*)

La arquitectura de inversores de cadena (*string inverters*) constituye el estándar tecnológico para la gestión de potencia en plantas fotovoltaicas de escala comercial e industrial. Esta configuración opera de manera distribuida, donde cada equipo se asocia a un conjunto específico de paneles conectados en serie, denominados cadenas o *strings*. Esta disposición permite gestionar de manera independiente el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) de cada sección, optimizando la captación energética global ante variaciones de radiación o desajustes físicos entre módulos (Kouro et al., 2015).

Internamente, la operación del equipo consiste en adecuar la energía en Corriente Continua (CC) proveniente de los paneles para inyectarla a la red. Una vez que la energía ingresa al inversor y su tensión es estabilizada, el flujo se dirige hacia la etapa crítica del sistema: el puente inversor. Es en esta sección donde la totalidad de la potencia es procesada y transformada en Corriente Alterna (CA) mediante la acción de dispositivos semiconductores. Debido a que toda la carga energética de la cadena converge en esta última etapa de conversión, el puente inversor se somete a la mayor

exigencia operativa y térmica del equipo.

4.1.3. Semiconductores de potencia (IGBT)

El Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT, por sus siglas en inglés) es el componente de estado sólido fundamental en la etapa de inversión. En términos prácticos, el IGBT opera como un interruptor electrónico de alta velocidad encargado de permitir o bloquear el flujo de la energía eléctrica, transformando la corriente continua en alterna (Rashid, 2014).

Desde una perspectiva física y operativa, los módulos IGBT deben procesar la totalidad de la potencia proveniente del arreglo fotovoltaico a través de obleas de semiconductor de dimensiones sumamente reducidas (del orden de unos pocos centímetros cuadrados). Al concentrar tanta energía en un espacio tan pequeño, el componente enfrenta dos fenómenos inevitables: la resistencia natural al paso continuo de la corriente y la energía disipada cada vez que el interruptor cambia de estado.

Ambos factores generan una importante disipación de energía residual en forma de calor. Esta característica convierte físicamente al empaquetado del semiconductor en el foco térmico primario dentro del inversor, obligando a implementar estrategias de disipación para evitar la falla del equipo.

La Figura 1 muestra el flujo de energía desde el generador fotovoltaico hacia la red eléctrica, destacando el proceso de conversión CC-CA y la generación de pérdidas térmicas en los IGBT del inversor. Dichas pérdidas, asociadas a los fenómenos de conducción y conmutación, son disipadas en forma de calor y representan uno de los principales factores que condicionan el comportamiento térmico y la eficiencia del sistema.

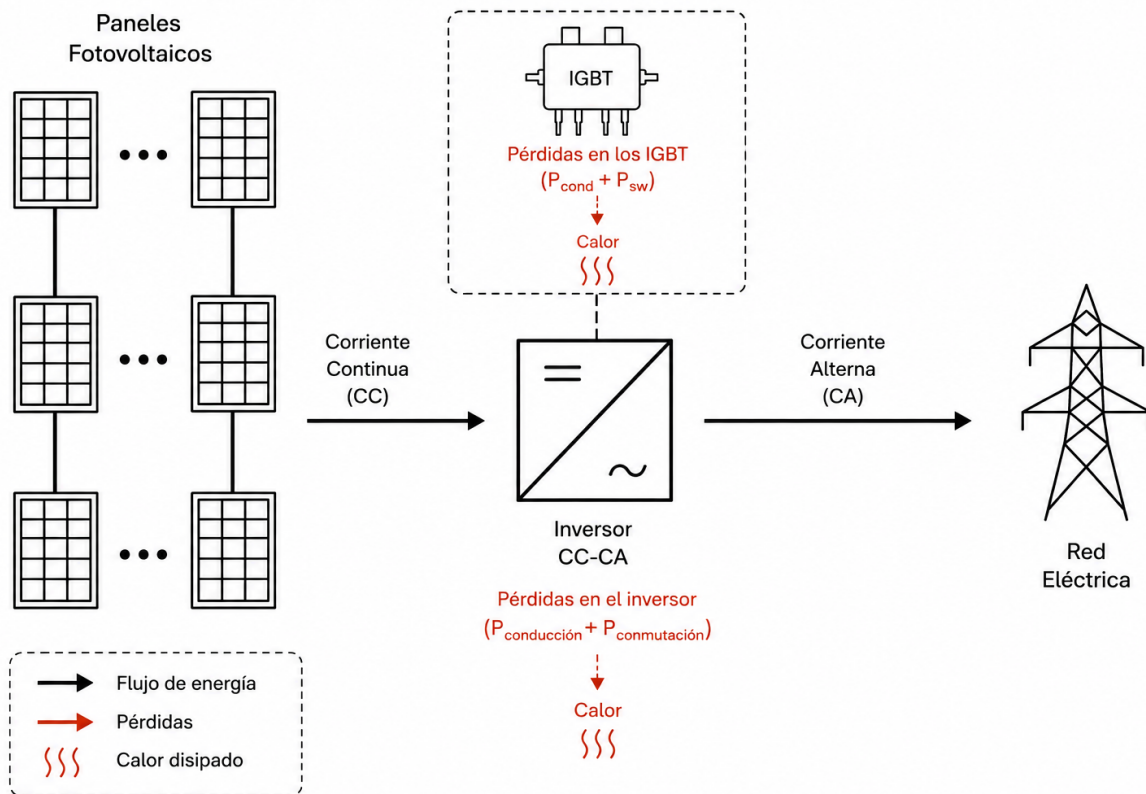


Figura 1. Flujo de energía y generación de pérdidas térmicas en el inversor fotovoltaico.
Elaboración propia

4.1.4. Generación de calor: Pérdidas por conducción y conmutación

La disipación de energía residual en los módulos IGBT, que se manifiesta físicamente como calor, es el resultado directo de las imperfecciones inherentes al semiconductor. Para efectos de modelamiento térmico, el calor total generado por el componente se cuantifica mediante la suma de dos fenómenos eléctricos independientes: las pérdidas por conducción y las pérdidas por conmutación (Rashid, 2014).

Las **pérdidas por conducción** (P_{cond}) ocurren durante el intervalo de tiempo en que el interruptor se encuentra en estado de encendido (*ON*) y la corriente fluye a través de él. Aunque el IGBT es altamente eficiente, presenta una resistencia interna que genera una caída de tensión.

De acuerdo con los modelos de estado sólido (Rashid, 2014), esta pérdida de potencia se modela matemáticamente como:

$$P_{cond} = V_{CE(sat)} \cdot I_C \cdot D \quad (1)$$

Donde $V_{CE(sat)}$ corresponde al voltaje de saturación colector-emisor, I_C es la corriente de colector que atraviesa el dispositivo y D representa el ciclo de trabajo (*duty cycle*), es decir, la fracción de tiempo que el componente permanece activo.

Por otro lado, las **pérdidas por conmutación** (P_{sw}) se producen durante las transiciones dinámicas entre los estados de encendido y apagado. Dado que el cambio de estado no es instantáneo, existe un breve solapamiento donde el voltaje y la corriente son simultáneamente distintos de cero, generando un pulso de energía disipada. Estas pérdidas, documentadas empíricamente por los fabricantes (Rashid, 2014), son directamente proporcionales a la frecuencia con la que opera el dispositivo:

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} \quad (2)$$

En esta expresión, E_{on} y E_{off} representan la energía disipada en cada evento de encendido y apagado respectivamente (valores tabulados por los fabricantes en mili-Joules), mientras que f_{sw} es la frecuencia de conmutación del sistema.

Finalmente, la potencia térmica total disipada por el semiconductor (P_{tot}) se define como la suma de ambas componentes eléctricas:

$$P_{tot} = P_{cond} + P_{sw} \quad (3)$$

4.2 Impacto térmico en la operación de inversores

La generación de calor al interior del puente inversor plantea un límite físico ineludible para la operación del equipo. Si la tasa de calor disipada excede la capacidad del sistema de refrigeración, la temperatura de los módulos IGBT aumentará continuamente. Los materiales semiconductores poseen límites térmicos estrictos para su funcionamiento seguro, típicamente con temperaturas máximas de unión (*junction temperature*) en torno a los 150 °C a 175 °C (Blaabjerg et al., 2012). Operar por encima de estos umbrales conduce a un estrés termo-mecánico severo y a la falla prematura del componente. Para evitar escenarios de daño catastrófico, los inversores modernos incorporan lazos de control dinámico que alteran su régimen de funcionamiento, priorizando la supervivencia del equipo por sobre la maximización de la producción de energía.

4.2.1. Mecanismo de autoprotección: *Thermal Derating*

El *derating* térmico (reducción de potencia por temperatura) es la principal estrategia de autoprotección activa implementada en los inversores de cadena. Este mecanismo consiste en una reducción intencional, algorítmica y controlada de la potencia de salida del equipo cuando los sensores internos detectan que la temperatura de los componentes críticos se acerca a su límite operativo seguro.

A nivel de control, cuando las condiciones de disipación son desfavorables y se activa el *derating*, el procesador del inversor abandona deliberadamente el algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT). Al desplazar su punto de operación en la curva de tensión-corriente (V-I) del arreglo fotovoltaico, el equipo fuerza una reducción en la corriente que ingresa al puente inversor. Como se estableció en la Ecuación 1, una disminución en la corriente (I_C)

reduce de forma inmediata la potencia térmica disipada, logrando estabilizar la temperatura interna (Rahman et al., 2024).

Desde la perspectiva de la gestión de operaciones y la evaluación de proyectos, el *derating* térmico no se clasifica como una falla técnica, sino como un estado operativo subóptimo de auto-protección. Sin embargo, su ocurrencia sostenida (especialmente en plantas fotovoltaicas ubicadas en zonas de alta irradiancia y temperaturas ambientales extremas) disminuye el factor de planta, traduciéndose en una pérdida neta de energía inyectada a la red y generando un lucro cesante directo para el modelo de negocios.

4.2.2. Degradación termomecánica y estimación de vida útil

Incluso cuando los mecanismos de autoprotección como el *derating* logran mantener la temperatura del puente inversor por debajo de los límites críticos de falla instantánea, el equipo permanece sometido a un proceso de desgaste acumulativo. La causa fundamental de este deterioro no es únicamente la temperatura absoluta alcanzada, sino la amplitud y frecuencia de las fluctuaciones térmicas, fenómeno conocido como ciclado térmico (*thermal cycling*) (Ciappa, 2002).

Un módulo IGBT está compuesto por múltiples capas de materiales con distintas propiedades físicas y Coeficientes de Expansión Térmica (CTE) diferentes. Durante la operación diaria, donde el inversor se calienta con la radiación solar y se enfría en la noche, estas capas se expanden y contraen a ritmos dispares, generando esfuerzos cortantes en las interfaces de unión. A largo plazo, esto provoca fatiga termomecánica, manifestada en micro-grietas en la soldadura base y el desprendimiento de los cables de conexión del chip.

Para cuantificar este deterioro y estimar la vida útil remanente del componente, la industria utiliza modelos analíticos de fatiga. El modelo clásico original de Coffin-Manson relacionaba los

ciclos hasta la falla exclusivamente con la deformación plástica del material. Sin embargo, para aplicaciones de electrónica de potencia, esta formulación fue adaptada asumiendo que la deformación estructural es directamente proporcional a la amplitud de la oscilación térmica (ΔT). Al acoplar esta premisa con la ecuación de Arrhenius (para incorporar el efecto acelerador de la temperatura media de operación T_m), se obtiene el **modelo modificado de Coffin-Manson-Arrhenius** (conocido también como modelo de Norris-Landzberg) (Bayerer et al., 2008). La formulación matemática de este modelo establece que la cantidad de ciclos térmicos antes de la falla (N_f) se define como:

$$N_f = A \cdot (\Delta T)^{-\alpha} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T_m}\right) \quad (4)$$

Donde A y α son constantes empíricas dependientes de los materiales del módulo, E_a es la energía de activación del mecanismo de falla y k_B es la constante de Boltzmann. La implicancia analítica de esta ecuación para la gestión de activos es contundente: la vida útil del equipo cae de manera exponencial ante incrementos en la amplitud del ciclo térmico.

Desde el punto de vista de la confiabilidad operativa, la degradación genera además un ciclo destructivo de retroalimentación: a medida que la soldadura se agrieta, la resistencia térmica del componente aumenta, dificultando la disipación del calor y elevando aún más T_m y ΔT (Blaabjerg et al., 2012). En consecuencia, una gestión térmica deficiente no solo afecta la producción diaria, sino que agota prematuramente los ciclos de vida (N_f) del inversor, forzando un recambio anticipado que impacta directamente en los costos operativos y en la rentabilidad a largo plazo de los equipos.

4.2.3. Impacto en la eficiencia de conversión

El aumento de la temperatura operativa en el puente inversor no solo compromete la vida útil del equipo y fuerza la activación del *derating*, sino que también afecta la termodinámica de la conversión de energía. La eficiencia de un inversor fotovoltaico (definida como la relación entre la potencia de Corriente Alterna (CA) inyectada a la red y la potencia de Corriente Continua (CC) absorbida del arreglo) presenta una dependencia inversamente proporcional a la temperatura de operación.

A nivel de semiconductores, un incremento en la temperatura de unión (T_j) de los módulos IGBT altera sus características eléctricas intrínsecas. Específicamente, en la mayoría de los componentes de potencia de silicio, el voltaje de saturación ($V_{CE(sat)}$) presenta un coeficiente de temperatura positivo; es decir, aumenta a medida que el componente se calienta (Rahman et al., 2024). Como se demostró en el cálculo de las pérdidas por conducción (Ecuación 1), un mayor voltaje de saturación se traduce matemáticamente en una mayor caída de tensión y, por ende, en una mayor disipación de calor.

Esto genera una penalización energética circular: a mayor temperatura ambiental u operativa, el inversor consume internamente una mayor fracción de la energía generada para superar su propia resistencia térmica y eléctrica. En términos de desempeño industrial, esta caída en la eficiencia implica que, incluso en rangos térmicos donde las protecciones no han sido activadas, la planta experimentará una merma silenciosa pero continua en su producción. Cuantificar y mitigar este impacto es el objetivo central de la optimización del diseño térmico, demostrando que una mejor refrigeración incrementa directamente el rendimiento energético del proyecto. La Figura 2 ilustra el proceso que conduce a la aparición de este problema.

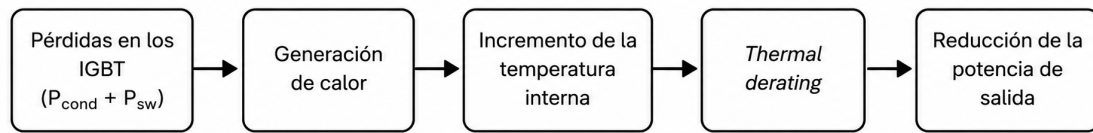


Figura 2. Efecto de las pérdidas en los IGBT sobre la potencia de salida.
Elaboración propia

4.3 Fundamentos de transferencia de calor

La termodinámica clásica establece que la energía residual disipada por los semiconductores de potencia, originada por sus inevitables ineficiencias eléctricas, debe ser evacuada hacia el entorno para mantener el equilibrio del sistema. Sin embargo, mientras que la termodinámica determina la cantidad total de energía térmica involucrada entre dos estados de equilibrio, es la ciencia de la transferencia de calor la que permite predecir la *tasa* (o velocidad) a la cual este intercambio ocurre frente a un gradiente de temperatura espacial (Çengel, 2007).

En el contexto de los inversores fotovoltaicos, el diseño y optimización de un sistema de refrigeración depende de la capacidad para extraer el calor desde su foco de generación primario (la diminuta unión de silicio en el módulo IGBT) y transportarlo a través de múltiples capas de materiales sólidos hasta disiparlo finalmente en el aire ambiente. Para modelar matemáticamente este recorrido térmico y predecir las temperaturas operativas de los componentes, es imperativo comprender los tres mecanismos físicos fundamentales mediante los cuales la energía se propaga: conducción, convección y radiación. La Figura 3 muestra las principales rutas de transferencia de

calor consideradas en el modelo.

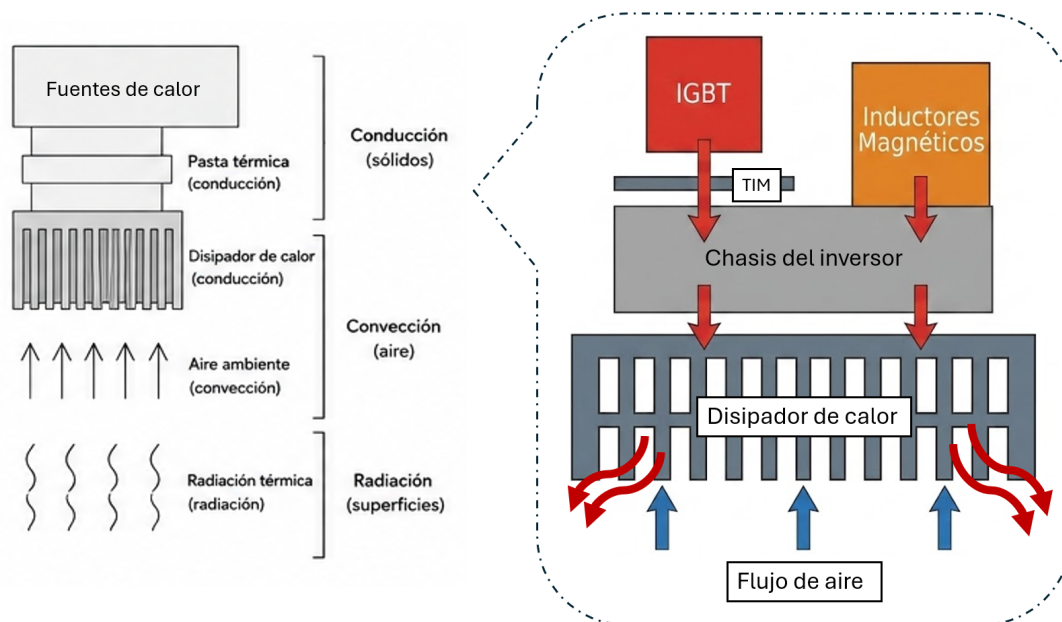


Figura 3. *Mecanismos de transferencia de calor desde los componentes internos hacia el ambiente en un inversor fotovoltaico.*

Elaboración propia

A continuación, se establecen los principios teóricos y las ecuaciones rectoras que gobiernan cada uno de estos fenómenos, proporcionando la base analítica necesaria para el posterior desarrollo de las simulaciones numéricas.

4.3.1. Conducción térmica en materiales sólidos

La conducción es el mecanismo de transferencia de energía térmica desde las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones a nivel atómico y molecular. En el contexto de un módulo IGBT, este es el fenómeno primario responsable de trasladar el calor desde el chip de silicio, a través de las capas de soldadura y el sustrato, hasta la base del disipador.

La tasa de transferencia de calor por conducción ($\dot{Q}_{cond}$) a través de un medio homogéneo

está gobernada por la **Ley de Fourier** (Çengel, 2007), que establece que el flujo térmico es proporcional al gradiente de temperatura y al área de la sección transversal. En su forma fundamental, se expresa como:

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Donde k es la conductividad térmica del material (W/m·K), A es el área transversal al flujo y dT/dx representa el gradiente de temperatura. El signo negativo denota que el calor fluye hacia la temperatura decreciente.

Para el modelamiento de sistemas electrónicos, el enfoque de resistencia térmica permite simplificar el análisis de estructuras multicapa (Çengel, 2007). En esta analogía, la diferencia de temperatura (ΔT) es equivalente al voltaje, el flujo de calor ($\dot{Q}$) a la corriente, y la resistencia térmica (R_{th}) a la resistencia eléctrica:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (6)$$

Este enfoque de resistencias térmicas es la base para entender cómo las distintas capas se oponen al flujo de calor desde el semiconductor hacia el disipador, proporcionando una herramienta analítica robusta para estimar la temperatura de unión antes de abordar simulaciones de mayor complejidad geométrica.

4.3.2. Convección térmica (Natural y Forzada)

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que ocurre entre una superficie sólida y un fluido adyacente en movimiento (en este caso, aire) que se encuentran a distintas temperaturas. A diferencia de la conducción, este proceso involucra los efectos combinados de la conducción molecular dentro del fluido y el movimiento macroscópico del mismo, lo que facilita

una extracción de energía térmica significativamente más rápida (Çengel, 2007).

La tasa de transferencia de calor por convección ($\dot{Q}_{conv}$) se rige fundamentalmente por la **Ley de Enfriamiento de Newton**, la cual se expresa como:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (7)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección (expresado en $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), A_s es el área de la superficie de contacto con el fluido, T_s es la temperatura de la superficie del componente (o disipador) y T_{∞} es la temperatura del aire en el medio libre, suficientemente alejado de la capa límite térmica.

En la gestión térmica de inversores de potencia, la convección se clasifica en dos regímenes operativos fundamentales (Rahman et al., 2024):

- **Convección Natural (o Libre):** El movimiento del aire es inducido exclusivamente por las fuerzas de flotabilidad que surgen debido a las diferencias de densidad en el fluido (el aire caliente cercano al disipador asciende al volverse más liviano). Es el mecanismo estándar en inversores de diseño pasivo (Çengel, 2007).
- **Convección Forzada:** El flujo de aire es impulsado sobre la superficie por un medio mecánico externo, como ventiladores (fanés). Al aumentar artificialmente la velocidad del fluido, el espesor de la capa límite térmica disminuye, lo que incrementa drásticamente el coeficiente h y permite disipar flujos de calor mucho mayores en comparación con la convección libre (Çengel, 2007).

Cabe destacar que el coeficiente h no es una propiedad termofísica intrínseca del fluido,

sino un parámetro complejo que depende fuertemente de la geometría de la superficie, la velocidad del flujo y las propiedades dinámicas del aire. La correcta estimación de este coeficiente mediante números adimensionales (como el número de Nusselt, Nu) es lo que diferencia una refrigeración eficiente de un punto crítico de falla operativa.

4.3.3. Radiación térmica en componentes electrónicos

La radiación térmica es el proceso mediante el cual las superficies sólidas emiten energía en forma de ondas electromagnéticas, resultado directo de la agitación térmica de las partículas cargadas dentro de la materia. A diferencia de la conducción y la convección, este mecanismo no requiere de un medio material para propagarse, siendo capaz de transferir energía incluso a través del vacío.

Para un cuerpo real, la tasa de emisión de energía por radiación ($\dot{Q}_{rad}$) se describe analíticamente mediante la **Ley de Stefan-Boltzmann** (Çengel, 2007):

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (8)$$

Donde:

- ε es la emisividad del material (adimensional, entre 0 y 1), que cuantifica la eficiencia con la que la superficie emite energía respecto a un cuerpo negro ideal.
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).
- A es el área de la superficie emisora.
- T_s y T_{sur} son las temperaturas absolutas de la superficie del inversor y del entorno (o paredes

circundantes), respectivamente.

En el diseño térmico de inversores, la importancia de la radiación radica en su dependencia de la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Esto implica que, mientras que la convección y la conducción dominan en rangos de temperatura moderados, la radiación se vuelve un mecanismo de disipación cada vez más relevante a medida que el componente alcanza temperaturas más elevadas.

Además, es crucial considerar que los componentes electrónicos suelen estar confinados en envoltorios metálicos. En estos casos, el intercambio de calor por radiación se produce entre la superficie del componente caliente y las paredes internas del chasis del inversor, estableciendo un sistema de múltiples superficies que deben ser consideradas para un balance térmico preciso (Çengel, 2007).

4.4 Modelación y simulación térmica computacional

La resolución analítica de los problemas de transferencia de calor, gobernados por ecuaciones diferenciales parciales, está limitada a geometrías simples e idealizadas con condiciones de borde estáticas. Sin embargo, el puente inversor fotovoltaico y su sistema de disipación asociado presentan geometrías complejas, múltiples capas de materiales con distintas conductividades térmicas y fuentes de generación de calor dinámicas. Ante esta complejidad geométrica y operativa, la obtención de soluciones exactas resulta matemáticamente inviable, haciendo imperativo el uso de técnicas de modelación computacional (Çengel, 2007).

4.4.1. Métodos numéricos en transferencia de calor

Los métodos numéricos transforman las ecuaciones diferenciales continuas que describen el flujo de calor en sistemas de ecuaciones algebraicas discretas. Como se establece en la literatu-

ra clásica de termotransferencia, enfoques fundamentales como el Método de Diferencias Finitas (MDF) logran esta discretización reemplazando las derivadas matemáticas de la ecuación de conducción por diferencias algebraicas evaluadas en una malla nodal (Çengel, 2007).

En el estado del arte de los sistemas de conversión de energía, modelos de acoplamiento opto-electro-térmico (como los propuestos por (Wang et al., 2025)) representan el estándar teórico para el análisis de fenómenos complejos. Dichas arquitecturas de simulación establecen que el dominio físico se divide en nodos de la malla sobre los cuales se calcula iterativamente el flujo térmico, proporcionando la base teórica necesaria para evaluar el estrés térmico bajo regímenes dinámicos sin requerir experimentación física a escala.

4.4.2. Simulación en régimen bidimensional (2D)

El desarrollo de simulaciones térmicas transitorias exige establecer un balance riguroso entre la fidelidad física del modelo y el costo computacional asociado a su resolución iterativa. Aunque los componentes físicos operan en un entorno tridimensional (3D), simular perfiles dinámicos a lo largo de un ciclo solar de 24 horas requiere que el algoritmo procese miles de iteraciones temporales. La ejecución de un modelo 3D bajo este régimen implica un costo computacional significativamente mayor, debido al incremento significativo del tamaño de las matrices numéricas involucradas. de las matrices numéricas involucradas en la discretización tridimensional, fenómeno discutido en marcos de acoplamiento numérico similares (Wang et al., 2025).

Para viabilizar la ejecución del simulador sin sacrificar la precisión técnica en la zona de mayor criticidad, el análisis se reduce a un régimen bidimensional (2D). Esta simplificación metodológica se fundamenta analíticamente en la arquitectura física de los inversores de cadena: sus disipadores de calor son piezas metálicas extruidas, cuya geometría se mantiene constante a lo lar-

go de su eje longitudinal (z). Al ser la longitud del componente significativamente mayor que su sección transversal, las variaciones térmicas a lo largo del eje longitudinal se consideran despreciables, lo que permite anular matemáticamente el gradiente en dicha dirección ($\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$). Bajo esta premisa, la ecuación general tridimensional de conducción de calor en coordenadas cartesianas, establecida por (Çengel, 2007), se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

Donde $\dot{e}_{gen}$ es la tasa de calor interno generado (derivada de las pérdidas de los IGBTs en la Ecuación 3), k es la conductividad térmica y α es su difusividad térmica. Este modelo 2D garantiza tiempos de cómputo operativos, permitiendo evaluar topologías de aletas con una precisión adecuada para el análisis comparativo de configuraciones térmicas.

4.4.3. Sistemas de disipación por aire

La refrigeración en electrónica de potencia está limitada por la reducida área superficial del empaquetado del módulo IGBT, la cual resulta insuficiente para disipar los flujos de calor generados mediante convección natural o forzada simple. De acuerdo con la Ley de Enfriamiento de Newton (Ecuación 7), la transferencia de calor es directamente proporcional al área de contacto (A_s); por tanto, la estrategia estándar de diseño consiste en integrar superficies extendidas, denominadas aletas, que incrementan drásticamente el área efectiva de disipación.

La tasa real de transferencia de calor desde una superficie extendida se modela mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{aleta} = \eta_{aleta} \cdot h \cdot A_{aleta} \cdot (T_b - T_{\infty}) \quad (10)$$

Donde η_{aleta} (eficiencia de la aleta) es un factor adimensional que corrige el hecho de que la temperatura de la aleta no es constante; esta disminuye gradualmente desde la temperatura de la base (T_b) hacia la punta debido a la propia resistencia térmica por conducción del material. Una aleta ideal tendría $\eta_{aleta} = 1$ (si su conductividad fuera infinita), pero en la práctica, el diseño debe equilibrar la longitud y el espesor de la aleta para evitar que la punta alcance temperaturas cercanas a la del aire ambiente, volviéndose ineficaz.

Adicionalmente, el diseño térmico enfrenta un compromiso técnico fundamental: si bien aumentar la densidad de aletas incrementa el área total (A_{aleta}), una separación excesivamente estrecha entre ellas puede provocar el solapamiento de las capas límite térmicas y un aumento en la caída de presión. Esto restringe el flujo de aire, degradando el coeficiente de convección (h) y anulando los beneficios del área adicional. Por consiguiente, la optimización del diseño no solo busca maximizar el área, sino encontrar la geometría óptima que garantice un régimen de flujo capaz de evacuar la carga térmica crítica sin comprometer la continuidad operativa del inversor (Rahman et al., 2024).

4.4.4. Implementación computacional y estabilidad del esquema temporal

El modelamiento térmico transitorio de sistemas bidimensionales se basa comúnmente en la resolución de la ecuación de conducción mediante esquemas explícitos de diferencias finitas. Para garantizar la convergencia y estabilidad de la solución, el cálculo del paso temporal (Δt) debe regirse estrictamente por el criterio de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), el cual asegura que

la propagación numérica de la información térmica sea consistente con los mecanismos físicos de difusión:

$$\Delta t = C \cdot \frac{\min(\Delta x^2, \Delta y^2)}{\alpha_{max}} \quad (11)$$

En esta expresión, α_{max} representa la difusividad térmica máxima del dominio y C un factor de seguridad numérico menor que la unidad. El cumplimiento de esta restricción resulta fundamental para asegurar que el esquema de discretización mantenga la estabilidad de la solución, evitando la amplificación de errores numéricos y garantizando resultados físicamente consistentes durante todo el régimen transitorio (Çengel, 2007).

4.4.5. Estado del Arte en Estrategias de Enfriamiento de Inversores

En la práctica industrial, los inversores de cadena dependen casi exclusivamente de sistemas de enfriamiento pasivo. Estos disipadores de aluminio extruido son el estándar del mercado porque no consumen energía y exigen un mantenimiento mínimo. Sin embargo, la literatura reciente advierte que la convección natural resulta cada vez más insuficiente para manejar las altas densidades de calor de los equipos modernos, sobre todo cuando operan a plena carga en zonas de alta radiación solar (Pathak et al., 2022).

Frente a esta limitación física, las investigaciones actuales señalan que integrar ventilación forzada es una de las soluciones más efectivas para mejorar el rendimiento de equipos ya instalados. Autores como Rahman et al. (Rahman et al., 2024) destacan que forzar el flujo de aire sobre las aletas del disipador rompe la capa límite térmica, lo que aumenta drásticamente la tasa de extracción de calor y evita que el semiconductor alcance temperaturas críticas.

El gran desafío es que probar distintos arreglos de ventilación directamente en terreno resulta altamente costoso y pone en riesgo operativo a los equipos. Por esta razón, el diseño térmico moderno se apoya en la simulación numérica. Trabajos recientes demuestran que los modelos computacionales de transferencia de calor logran predecir con gran exactitud cómo se comportará el inversor bajo distintas configuraciones de flujo de aire (Wang et al., 2025). En este contexto, el desarrollo de un modelo bidimensional predictivo permite evaluar la viabilidad técnica y rentabilidad económica de estas mejoras antes de cualquier implementación física, justificando directamente el enfoque metodológico de esta investigación.

4.5 Modelamiento de Perfiles Solares y Condiciones Ambientales

Para evaluar cualquier estrategia de optimización térmica en condiciones reales de operación, no basta con analizar el inversor de forma estática; es indispensable modelar el comportamiento dinámico de las variables meteorológicas del emplazamiento. La irradiancia solar global y la temperatura ambiente cambian constantemente a lo largo de un ciclo transitorio de 24 horas, una fluctuación que depende directamente de la temporada del año y de la ubicación geográfica de la planta fotovoltaica (Smets et al., 2016).

En el planteamiento del modelo térmico, estas condiciones climáticas dictan el comportamiento de las fronteras físicas del sistema. Por un lado, la irradiancia solar determina la corriente continua generada por el arreglo fotovoltaico. Esta corriente de operación es la variable que ingresa a los módulos IGBT y gatilla las pérdidas eléctricas por conducción y conmutación (modeladas en las Ecuaciones 1 y 2) definiendo así de manera dinámica la tasa de calor volumétrico generado ($\dot{e}_{gen}$) al interior del componente (Wang et al., 2025). Por otro lado, la temperatura ambiente fija el estado térmico de referencia del aire libre (T_{∞}), afectando de forma directa la capacidad del

disipador para evacuar energía por convección, de acuerdo con la Ley de Enfriamiento de Newton (Ecuación 7).

Representar analíticamente estos perfiles variables permite simular los escenarios más críticos en terreno, como los días de alta radiación y calor extremo en verano, donde el riesgo de pérdida de producción por *thermal derating* es máximo (Rahman et al., 2024). De esta manera, integrar perfiles meteorológicos transitorios en el esquema numérico permite proyectar el impacto térmico estacional sobre el rendimiento real del equipo.

4.6 Evaluación económica

La viabilidad de implementar mejoras en el sistema de refrigeración de un inversor fotovoltaico no depende únicamente de su desempeño termodinámico, sino de su factibilidad financiera. Un control térmico deficiente acelera la degradación de los semiconductores, aumentando los costos de reemplazo, y disminuye la energía inyectada a la red debido a las limitaciones de potencia por sobrecalentamiento (*derating*). Por lo tanto, la optimización del disipador debe evaluarse analizando el impacto de la solución propuesta sobre la estructura de costos y la capacidad de generación del equipo a lo largo de su vida útil.

4.6.1. Estructura de costos: CAPEX y OPEX

Para evaluar el impacto económico de la optimización térmica, los costos asociados al sistema se categorizan en dos componentes principales: el Gasto de Capital (CAPEX) y los Gastos Operativos (OPEX).

En el contexto de la solución tecnológica evaluada, el CAPEX incremental corresponde a la adquisición e integración del sistema de ventilación modular diseñado para potenciar el disipa-

dor estático original. Esta inversión inicial contempla el costo de los ventiladores, el hardware de montaje estructural y la electrónica de control necesaria para transicionar el sistema de un régimen de convección natural a uno de convección forzada.

Por otro lado, la incorporación de este sistema activo genera un efecto bidireccional en los Gastos Operativos (OPEX). En primer lugar, el módulo de ventilación introduce un consumo eléctrico parasitario y posee su propia curva de desgaste, lo que representa un costo de mantenimiento marginal. Sin embargo, al potenciar la tasa de remoción de calor (h) y reducir la temperatura operativa de los módulos IGBT, se disminuye exponencialmente la tasa de fallas del inversor (gobernada por el modelo de Arrhenius). El efecto neto proyectado es una reducción significativa del OPEX global, minimizando la frecuencia de mantenimientos correctivos, los tiempos de inactividad técnica (downtime) y el reemplazo prematuro de semiconductores de potencia.

5 Metodología

La metodología desarrollada en esta investigación se estructura en etapas consecutivas que permiten analizar el comportamiento térmico del inversor fotovoltaico, identificar las condiciones que conducen a la aparición de *thermal derating* y evaluar una estrategia de refrigeración activa como alternativa de mitigación. En primer lugar, se establecen las condiciones de operación del sistema a partir del perfil de irradiancia y la temperatura ambiente, determinándose posteriormente la potencia fotovoltaica procesada y las pérdidas eléctricas asociadas al inversor.

A partir de estas pérdidas se determina la generación de calor de los componentes analizados, la cual se incorpora al modelo térmico bidimensional desarrollado mediante el Método de Volúmenes Finitos. La resolución temporal del modelo permite obtener la evolución de la temperatura del IGBT y evaluar su relación con el límite de operación térmica y la reducción de potencia asociada al *thermal derating*.

Una vez caracterizado el escenario base, se incorpora una estrategia de refrigeración activa mediante ventilación forzada, con un sistema de control en base a la medición de la temperatura del inversor. Finalmente, se comparan ambos escenarios para determinar el efecto de la solución propuesta sobre la temperatura de operación y la energía inyectada, complementando el análisis con una evaluación económica de su implementación.

A continuación presenta el esquema general de la metodología, sintetizando la secuencia seguida desde la caracterización del escenario base hasta la evaluación de la solución de refrigeración propuesta.

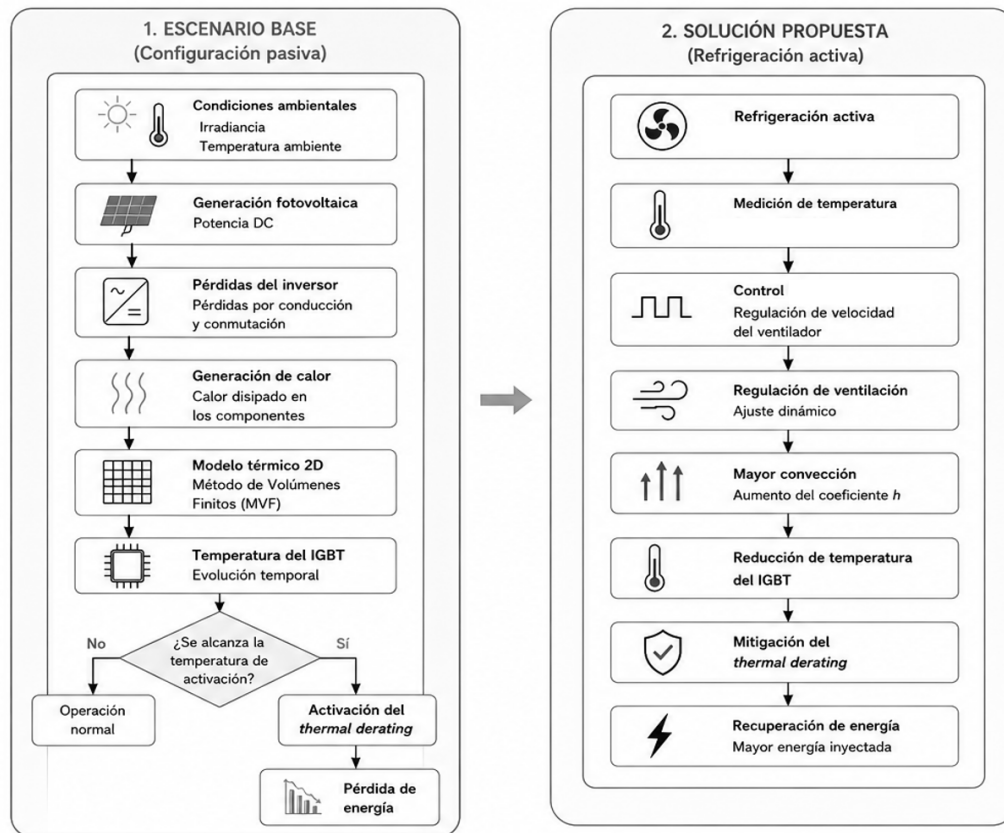


Figura 4. Esquema general de la metodología.
Elaboración propia

5.1 Definición del caso de estudio y caracterización física

Para el desarrollo del modelo térmico, se seleccionó como caso de estudio el inversor fotovoltaico de cadena Huawei SUN2000-100KTL-M2, un equipo de escala industrial ampliamente utilizado en el mercado. Este modelo presenta una potencia máxima en corriente alterna de 110 kW y una eficiencia de conversión europea declarada del 98.6 % (Huawei Technologies Co., Ltd., 2022). Desde el punto de vista arquitectónico, el equipo posee dimensiones físicas de 1035 mm de ancho, 700 mm de alto y 365 mm de profundidad, presentando un empaquetado compacto diseñado originalmente para operar a la intemperie mediante un sistema de disipación pasiva (convección natural).



Figura 5. *Inversor Huawei SUN2000-100KTL-M2., Adaptado de (Huawei Technologies Co., Ltd., 2022).*

5.1.1. Asignación de propiedades termofísicas

El dominio espacial fue segmentado para representar los distintos componentes internos del inversor: la placa disipadora trasera, la interfaz térmica (TIM), los módulos semiconductores (IGBT), los inductores magnéticos, la cámara de aire interna estancada y la cubierta de aluminio frontal.

5.1.2. Dominio espacial y discretización de la malla (2D)

En concordancia con los fundamentos teóricos expuestos previamente, la geometría tridimensional del inversor fue abstraída a un dominio bidimensional representativo de su sección transversal central. Si bien el equipo cuenta con dimensiones físicas externas de 0.700 m de alto y 0.365 m de profundidad, para fines de esta investigación se ha desarrollado un esquema bidimensional simplificado, el cual permite focalizar el análisis numérico en los gradientes térmicos de los componentes críticos.

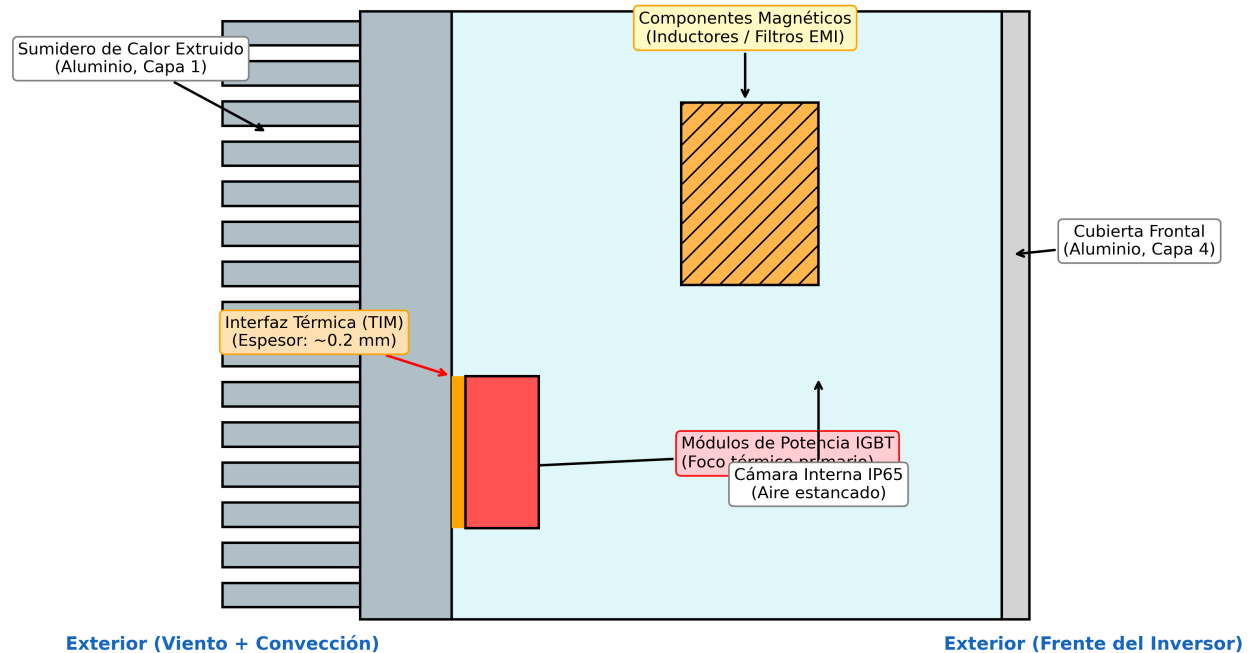
Esquema Transversal Representativo de la Arquitectura Térmica del Inversor

Figura 6. Esquema 2D para la modelación del inversor.
Elaboración propia

Para la resolución numérica, el área física fue discretizada en una malla estructurada de 30×45 nodos espaciales (N_x y N_y). Esta configuración genera volúmenes de control rectangulares con dimensiones físicas de $\Delta x \approx 12,6$ mm y $\Delta y \approx 15,9$ mm. Esta discretización garantiza una captura geométrica precisa de los gradientes térmicos en las interfaces críticas (como la capa de los semiconductores), manteniendo al mismo tiempo un costo computacional operativo viable para la ejecución de miles de iteraciones en régimen transitorio. Para cada nodo, se asignaron propiedades termofísicas estáticas que gobiernan la inercia térmica y la conducción de calor. Cabe destacar dos consideraciones de diseño numérico aplicadas en la matriz espacial:

Disipador efectivo: La zona correspondiente a las aletas del disipador trasero se modeló como un medio sólido efectivo. Su conductividad térmica fue ajustada a $k = 400$ W/mK para

emular la presencia de *heat pipes* bifásicos integrados en el perfil de aluminio (Steinberg, 1991), y su densidad se escaló volumétricamente para representar la proporción de vacío del canal de aire entre las aletas.

Material de Interfaz Térmica (TIM): Dado que el espesor real de la pasta térmica (0.2 mm) es inferior al paso espacial discreto de la malla (Δx), sus propiedades de densidad y conductividad fueron escaladas matemáticamente. Este escalamiento garantiza que la resistencia térmica equivalente de la celda nodal, definida como $R_{th} = \Delta x / k_{efectivo}$, sea idéntica a la resistencia real impuesta por el componente físico.

Módulos IGBT: Representan la fuente principal de pérdidas por conmutación y conducción. Se ubican en el tercio inferior del dominio, acoplados al disipador mediante la interfaz TIM. Poseen alta conductividad térmica para facilitar la evacuación de calor.

Inductores magnéticos: Modelados como componentes de alta densidad en la cámara de aire superior. Representan la carga térmica inductiva, considerando sus pérdidas en núcleo y bobinados como un generador de calor volumétrico distribuido.

Cámara de aire: El aire interno se modeló con una conductividad ajustada (3.5 W/mK) para simular condiciones de aire estancado.

Cubierta frontal: El aluminio de la tapa frontal actúa como cerramiento estructural, definido con propiedades de disipación superficial para interactuar con la radiación solar y convección ambiente.

Los parámetros termofísicos definitivos incorporados en las matrices espaciales del modelo numérico se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1: Propiedades termofísicas de los materiales asignados al modelo 2D.

Componente / Material	Densidad, ρ [kg/m ³]	Calor Específico, c_p [J/kgK]	Conductividad, k [W/mK]
Cubierta Frontal (Aluminio)	2770.0	875.0	177.0
Disipador Trasero (Efectivo)	612.0	875.0	400.0
Módulos IGBT (Silicio/Cobre)	8960.0	385.0	400.0
Inductores (Núcleo magnético)	1700.0	450.0	40.0
Pasta Térmica (TIM nominal)	2500.0	1000.0	3.0
Cámara Interna (Aire)	1.16	1007.0	3.5

Los parámetros numéricos presentados en la tabla han sido determinados considerando las características físicas y operativas de los componentes. La conductividad térmica del disipador trasero (400 W/mK) se ha ajustado para emular la presencia de *heat pipes* bifásicos integrados en el perfil de aluminio, basándose en los criterios de diseño para equipamiento electrónico propuestos por (Steinberg, 1991). En cuanto al material de interfaz térmica (TIM), sus propiedades han sido escaladas matemáticamente para asegurar que su resistencia térmica equivalente sea idéntica a la del componente físico real. Por su parte, las propiedades del aire estancado y la cubierta de aluminio siguen los estándares de transferencia de calor de (Çengel, 2007), mientras que los valores asociados a los módulos IGBT se alinean con las propiedades de los semiconductores de potencia descritas por (Rashid, 2014).

5.1.3. Hipótesis y supuestos del modelo

Para la construcción del esquema numérico, se han adoptado las siguientes hipótesis simplificadoras que definen el alcance y las limitaciones del modelo:

- **Reducción dimensional:** Se asume que el gradiente térmico a lo largo del eje longitudinal (z) es despreciable debido a la uniformidad geométrica del disipador, justificando la reduc-

ción del dominio a una sección transversal 2D.

- **Homogeneidad local:** Se asume que las propiedades termofísicas (densidad, calor específico, conductividad) son constantes dentro de cada nodo, excepto en las interfaces donde se aplica la media armónica.
- **Equilibrio térmico local:** El modelo asume que el sistema responde de forma coherente a los cambios de carga térmica, despreciando los fenómenos transitorios de micro-escala propios de la conmutación electrónica de alta frecuencia.
- **Generación del calor:** La generación de calor se representa como una pérdida global del inversor y no se separa explícitamente en pérdidas por conducción y conmutación del IGBT. La distribución térmica se asigna espacialmente entre las zonas del IGBT y del inductor mediante una aproximación proporcional. Este detalle es adecuado para analizar hotspots, derating térmico y sensibilidad del sistema al entorno.

5.2 Modelamiento del entorno operativo y perfiles térmicos

Para la ejecución de la simulación transitoria, se estructuró un entorno meteorológico diario de 24 horas, diseñado para replicar un escenario estival crítico, representativo de las condiciones climáticas de una región desértica. Este entorno determina las condiciones de contorno externas que rigen el intercambio energético del inversor con el medio ambiente.

5.2.1. Perfil solar y generación térmica dinámica

La radiación solar incidente (G) se modeló matemáticamente asumiendo una distribución en forma de campana sinusoidal truncada entre el amanecer (06:00 h) y el atardecer (18:00 h), con

un pico de irradiancia de 1050 W/m^2 . A partir de este perfil, se proyectó la curva de potencia en corriente continua (CC) asumiendo un factor de sobrefiteo de paneles solares (*Ratio DC/AC*) de 1.45, lo cual permite simular la meseta operativa del inversor bajo condiciones de alta carga.

La potencia inyectada define la tasa de generación térmica volumétrica ($\dot{e}_{gen}$) al interior de la malla numérica, calculada a partir de las pérdidas eléctricas derivadas de la eficiencia de conversión del equipo (98.6 % (Huawei Technologies Co., Ltd., 2022)). Simultáneamente, la temperatura ambiente (T_{amb}) se parametrizó mediante un perfil oscilatorio, estableciendo una mínima de 12°C durante la madrugada y un pico térmico de 35°C a las 14:00 horas. Este perfil térmico, integrado en la simulación, replica las condiciones de asoleamiento directo y transferencia de calor por convección natural sobre la envolvente del equipo.

5.2.2. Cálculo de sombreado y factores de forma

El análisis de radiación térmica en los bordes del dominio requirió un tratamiento asimétrico, diferenciando las condiciones de contorno entre la cara frontal y la cara trasera del inversor.

Para la chapa frontal, la cual recibe radiación solar directa (factor de sombra = 1.0), se aplicó una absorptividad solar del aluminio de $\alpha = 0,6$. Esto significa que el 60 % de la radiación solar que impacta en la tapa es absorbida y transformada en calor, calentando la estructura. Por otro lado, debido a que el inversor está montado en posición vertical, su capacidad para enfriarse mediante radiación infrarroja hacia el cielo se ve limitada. Esto se modeló mediante un factor de forma de $F = 0,5$, representando que la superficie frontal solo tiene un "campo de visión" hacia la mitad de la bóveda celeste, lo cual restringe su capacidad natural de disipar energía hacia el ambiente frío (Çengel, 2007).

En contraste, el disipador trasero se modeló bajo condiciones de asfixia térmica, estable-

ciendo un factor de forma radiativo significativamente reducido ($F = 0,05$) y una convección natural restringida, representando la instalación típica en estructuras de montaje bloqueadas o muros industriales. Esta restricción física en la cara posterior es el parámetro crítico que justifica la necesidad de implementar soluciones de refrigeración activa, ya que impide el intercambio térmico eficiente con el aire ambiente circundante.

5.3 Formulación del modelo térmico mediante MVF

El modelo térmico se fundamenta en el Método de Volúmenes Finitos (MVF), seleccionando esta técnica por su naturaleza intrínsecamente conservativa, lo que garantiza que la energía generada internamente sea contabilizada con precisión en su transferencia hacia el exterior, garantizando que cada vatio generado en el interior del inversor sea contabilizado rigurosamente. La resolución numérica de las ecuaciones discretizadas se implementó mediante un algoritmo desarrollado en lenguaje Python, utilizando las bibliotecas NumPy para la obtención de los perfiles de temperatura del inversor, asegurando alta eficiencia en el procesamiento de los ciclos de simulación transitoria de 24 horas. La temperatura se resuelve sobre una malla espacial que representa el inversor, el disipador, la interfaz térmica y el entorno inmediato. La ecuación de balance térmico utilizada es:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (12)$$

Donde Q representa la fuente interna de calor. En este caso, la potencia térmica se estima a partir de la potencia nominal del inversor y de la eficiencia global del convertidor. La pérdida máxima asociada al sistema se calcula como:

$$P_{perdida,max} = P_{AC}(1 - \eta) \quad (13)$$

Con $P_{AC} = 110$ kW y $\eta = 0,986$, dando un valor aproximado de 1540 W. Luego, la fuente térmica instantánea se escala con la irradiación solar mediante:

$$Q_{gen}(t) = \frac{P_{ideal}(t)}{P_{nominal}} \cdot P_{perdida,max} \quad (14)$$

Donde $P_{ideal}(t)$ corresponde a la potencia útil del sistema en cada instante del ciclo diario.

Esta formulación permite estudiar la evolución temporal de los focos de calor y el efecto del derating térmico sin requerir un modelo electro-térmico detallado del semiconductor.

5.3.1. Balance energético nodal

La discretización se basa en el balance de energía aplicado a cada volumen de control. Para un nodo genérico con temperatura T_p , la ecuación de conservación se expresa como:

$$\rho c_p V \frac{dT_p}{dt} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{cond,i} + \dot{Q}_{gen} + \dot{Q}_{conv} \quad (15)$$

Donde $\dot{Q}_{cond}$ representa el flujo de calor conductivo hacia los nodos vecinos, $\dot{Q}_{gen}$ la generación de calor volumétrica interna (pérdidas en IGBTs e inductores) y $\dot{Q}_{conv}$ el flujo de intercambio con el ambiente.

5.3.2. Dominio espacial y discretización de la malla (2D)

El dominio físico del inversor fue discretizado en una malla estructurada de $N_x = 30$ y $N_y = 45$ nodos, definiendo un total de 1350 volúmenes de control. La construcción de esta malla

se basa en la división equitativa de las dimensiones externas del equipo (L_x, L_y) por el número de intervalos definidos:

$$\Delta x = \frac{L_x}{N_x}, \quad \Delta y = \frac{L_y}{N_y} \quad (16)$$

Donde las dimensiones resultantes de los volúmenes de control son $\Delta x \approx 12,6$ mm y $\Delta y \approx 15,9$ mm. Esta estructuración del dominio implica las siguientes consideraciones para el cálculo del balance de energía:

- **Indexación Nodal:** Cada nodo (i, j) representa el centro geométrico de un volumen de control de volumen $V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot L_z$.
- **Cálculo de Flujos:** El balance energético se evalúa en las caras de cada volumen de control, donde el flujo de calor por conducción entre nodos adyacentes (i, j) e $(i + 1, j)$ se calcula considerando la distancia central nodal Δx .
- **Captura de gradientes:** La resolución de 30×45 nodos fue seleccionada para garantizar que los gradientes térmicos en las interfaces de alta resistencia (como la capa TIM de 0.2 mm) sean adecuadamente representados mediante la escala efectiva de propiedades, evitando la necesidad de un alto consumo computacional.

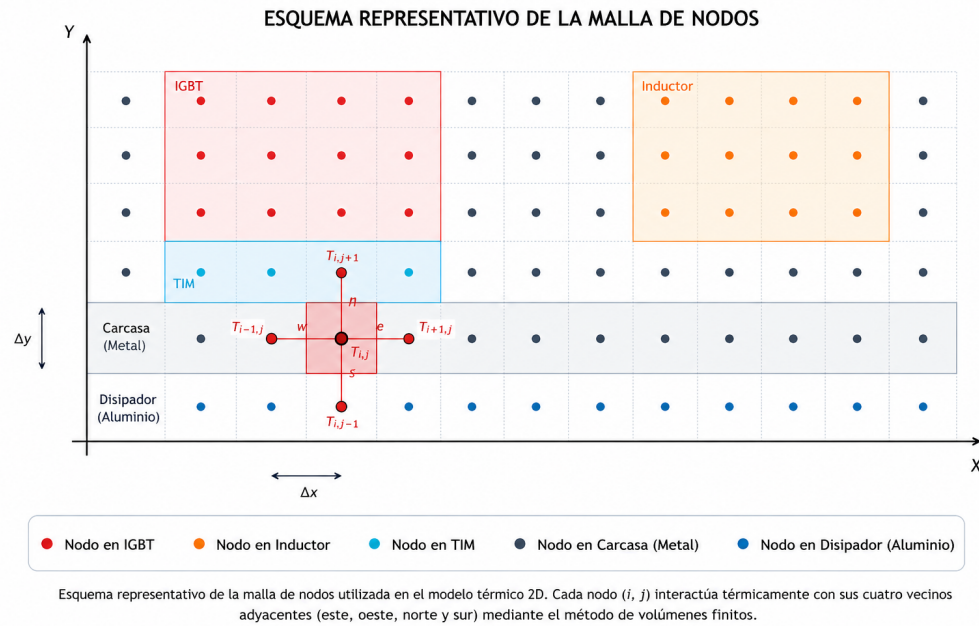


Figura 7. Esquema representativo de la malla de nodos empleada en el modelo térmico 2D.
Elaboración propia

La representación presentada en la Figura 7 es de carácter esquemático y tiene como objetivo ilustrar la discretización espacial del dominio, la distribución de los nodos y el intercambio térmico entre volúmenes de control. La disposición mostrada no corresponde a la configuración geométrica real del inversor debido a la cantidad de nodos espaciales utilizados en la simulación.

5.3.3. Tratamiento del coeficiente de convección (h)

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) se calcula dinámicamente, integrando regímenes mediante la metodología de Churchill y Usagi (Churchill y Usagi, 1972).

1. Convección Forzada: Se calcula mediante la correlación empírica de McAdams (McAdams, 1954):

$$h_{forz} = 5,7 + 3,8v_{viento}. \quad (17)$$

2. Integración mediante Churchill-Usagi: Para la transición suave entre convección natural y

forzada, se emplea la regla de combinación:

$$h_{tot} = (h_{nat}^3 + h_{forz}^3)^{1/3} \quad (18)$$

Esta formulación (Churchill y Usagi, 1972) garantiza la coherencia física del modelo transitorio, reflejando el aumento en la evacuación térmica al activar los ventiladores sin inducir inestabilidades numéricas.

5.3.4. Implementación de la Media Armónica en interfaces

Para gestionar la transición de calor entre materiales con conductividades drásticamente distintas (ej. módulos IGBT y pasta TIM), se emplea la media armónica de la conductividad (k_{int}):

$$k_{int} = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} \quad (19)$$

Este tratamiento garantiza la continuidad del flujo térmico a través de las interfaces, evitando discontinuidades artificiales en el cálculo de temperaturas y asegurando la robustez numérica del modelo sin requerir un refinamiento extremo de la malla.

5.3.5. Estabilidad numérica

Dado que se ha implementado un esquema de resolución temporal explícito, la estabilidad del modelo está supeditada al criterio de Fourier (estabilidad de Von Neumann). Para garantizar que la solución numérica no diverja ni presente oscilaciones artificiales, el paso de tiempo (Δt) se ha restringido dinámicamente según la condición de estabilidad unidimensional:

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha} \quad (20)$$

Donde α es la difusividad térmica del material más restrictivo de la malla. Esta restricción asegura que la información térmica no "salte" más de un nodo en un solo intervalo temporal, manteniendo la integridad física de la simulación durante todo el transitorio de 24 horas.

5.4 Estrategia de control de refrigeración activa

La estrategia propuesta consiste en la transición desde un régimen de enfriamiento pasivo, basado exclusivamente en la convección natural del disipador de aluminio extruido, hacia un sistema de refrigeración activa mediante la integración de un módulo de ventilación forzada. Como se observa en la **Figura 8**, este diseño emplea un *plenum* carenado para dirigir el flujo y un sensor PT100 para la realimentación térmica del sistema de control.

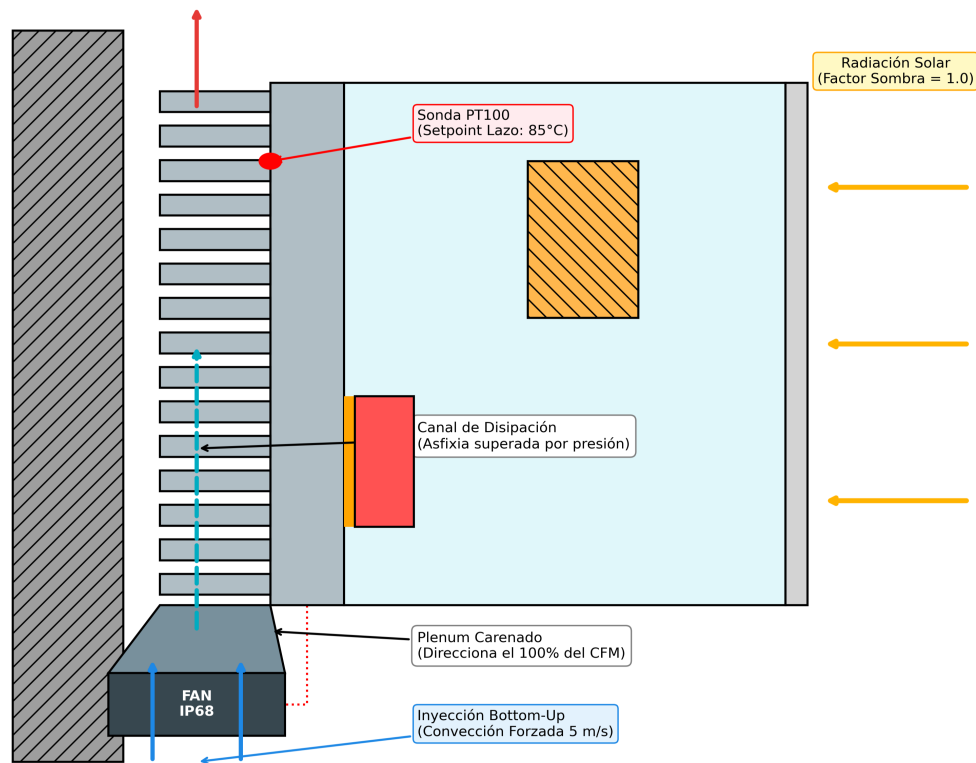


Figura 8. *Arquitectura térmica del inversor con sistema de enfriamiento activo modular.*
Elaboración propia

Esta intervención se fundamenta en la necesidad técnica de incrementar la tasa de extracción de calor en condiciones de alta carga, mitigando las limitaciones propias de la disipación pasiva descritas en la literatura (Pathak et al., 2022).

El alcance de esta metodología contempla dos dimensiones:

- **Integración Física:** Implementación de un arreglo de ventilación modular acoplado al disipador trasero, diseñado para aumentar el coeficiente de transferencia de calor (h) mediante el flujo forzado.
- **Control Inteligente:** Sustitución del régimen pasivo por una estrategia de control de potencia variable. Esta medida busca mitigar el fenómeno del *thermal derating* —evitando que el inversor limite su potencia de salida por autoprotección— y optimizar la vida útil de

los semiconductores al reducir la amplitud de los ciclos térmicos a los que están sometidos (Blaabjerg et al., 2012).

Esta propuesta metodológica permite evaluar el incremento en el desempeño térmico frente al costo operativo del sistema, permitiendo que la planta fotovoltaica maximice su energía inyectada a la red sin incurrir en rediseños estructurales mayores del equipo (Pathak et al., 2022).

5.4.1. Diseño del sistema de refrigeración activa

La solución técnica propuesta incorpora un *plenum* carenado como componente esencial para la gestión del flujo de aire. La función de este dispositivo es actuar como una cámara de presurización que garantiza que el 100 % del caudal generado por el ventilador sea forzado a través de los canales del disipador, superando la *asfixia térmica* o resistencia aerodinámica que caracteriza a las configuraciones pasivas originales. Sin este carenado, gran parte del flujo se perdería por recirculación lateral, reduciendo drásticamente la eficiencia del sistema.

En cuanto a la velocidad operativa de 5 m/s, esta ha sido seleccionada mediante un criterio de optimización de ingeniería: representa el punto de equilibrio donde se rompe la capa límite térmica para maximizar el coeficiente de convección (h), sin incrementar excesivamente el consumo eléctrico parasitario del ventilador. Esta configuración permite al inversor operar de manera eficiente en condiciones de carga nominal, validando la estrategia propuesta en estudios de gestión térmica para convertidores de potencia (Rahman et al., 2024).

5.4.2. Estrategia de control y realimentación (Sensor PT100)

El sistema de refrigeración activa implementa un lazo de control cerrado para la gestión dinámica del flujo de aire. El elemento central de este lazo es una sonda de temperatura de precisión

tipo PT100, la cual actúa como el transductor de entrada. Este sensor se encuentra estratégicamente instalado en el disipador trasero del inversor, permitiendo registrar la temperatura local (T_{med}) en tiempo real.

La función del PT100 es proporcionar una señal eléctrica proporcional a la temperatura detectada, la cual es procesada por el algoritmo de control para determinar el estado operativo del sistema. Esta realimentación es crítica, ya que transforma un sistema de refrigeración de respuesta fija en un esquema adaptativo, capaz de ajustar la potencia de los ventiladores exclusivamente ante la presencia de carga térmica real.

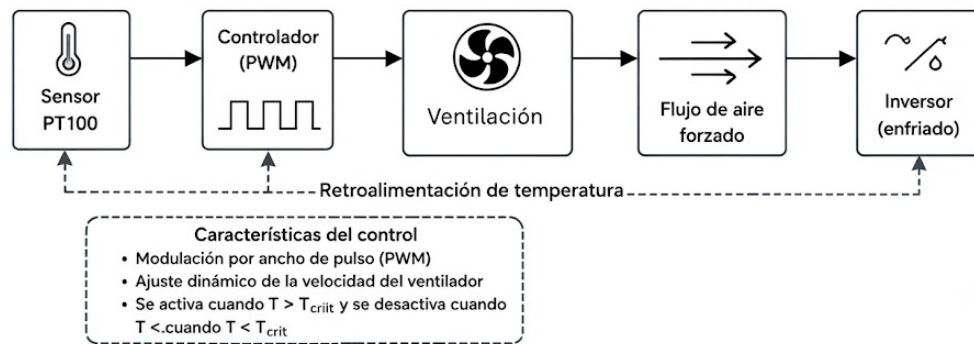


Figura 9. Diagrama del sistema de enfriamiento activo.
Elaboración propia

5.4.3. Ley de control proporcional (PWM) y acoplamiento térmico

El sistema de refrigeración activa opera mediante un lazo de control cerrado que mide la temperatura en el punto crítico del disipador (T_{med}) mediante el sensor PT100. El controlador implementa una interpolación lineal para definir la velocidad del aire (v_{vent}) en función del estado térmico, permitiendo un arranque suave y una modulación continua.

La velocidad del aire se determina mediante la relación de ciclo de trabajo (PWM):

$$v_{vent}(T_{med}) = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{med} < T_{min} \\ v_{max} \cdot \left(\frac{T_{med} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right) & \text{si } T_{min} \leq T_{med} < T_{max} \\ v_{max} & \text{si } T_{med} \geq T_{max} \end{cases} \quad (21)$$

Una vez obtenida la velocidad (v_{vent}), el modelo actualiza dinámicamente el coeficiente de transferencia de calor forzado. Siguiendo la correlación de McAdams para la componente de flujo forzado ($h_{forz_pura} = 3,8 \cdot v_{vent}$) y combinándola con la convección natural del canal (h_{nat}) mediante la metodología de Churchill y Usagi (Churchill y Usagi, 1972), se obtiene el coeficiente global de convección (h_{tot}):

$$h_{tot} = (h_{nat}^3 + (3,8 \cdot v_{vent})^3)^{1/3} \quad (22)$$

Este coeficiente h_{tot} se inyecta en el balance energético nodal (Ec. 15) en cada paso de tiempo, cerrando el lazo de realimentación. De esta forma, el algoritmo simula la respuesta electromecánica real del sistema de control: a medida que el sensor PT100 detecta un incremento en T_{med} , el controlador aumenta proporcionalmente la velocidad del ventilador, incrementando el coeficiente de transferencia de calor y, consecuentemente, acelerando la evacuación de energía desde el disipador.

5.5 Validación del modelo numérico

La validación del modelo se realizará mediante la comparación de los resultados obtenidos con antecedentes reportados en la literatura especializada y con las especificaciones técnicas del inversor Huawei SUN2000-100KTL-M2. En particular, se contrastarán las temperaturas de

operación, el comportamiento del fenómeno de thermal derating, la reducción de potencia bajo condiciones de alta carga térmica y las pérdidas energéticas asociadas. La concordancia entre las tendencias obtenidas mediante la simulación y las reportadas en estudios experimentales permitirá evaluar la capacidad predictiva del modelo propuesto.

5.6 Metodología de evaluación económica

Para determinar la viabilidad financiera de la optimización térmica propuesta, se ha definido una metodología de análisis incremental basada en la evaluación costo-beneficio. Este enfoque permite comparar el caso de referencia (enfriamiento pasivo) frente al escenario optimizado (enfriamiento activo) bajo una misma base de generación proyectada.

5.7 Definición del modelo de costos

La evaluación se estructura mediante los siguientes componentes:

- **Análisis Incremental (CAPEX):** Se cuantifica la inversión inicial asociada a la implementación del retrofit, incluyendo el costo de los ventiladores IP68, el *plenum* carenado y los componentes electrónicos de control y sensado (PT100).
- **Balance Operativo (OPEX):** Se calcula el efecto neto en los costos operativos comparando:
 - *Costos incrementales:* Consumo energético de los ventiladores y mantenimiento de los actuadores.
 - *Ahorros proyectados:* Estimación de la energía recuperada al evitar el *thermal derating* y la reducción en las tasas de falla de los semiconductores según el modelo de Arrhenius (Blaabjerg et al., 2012).

6 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación numérica, organizados para contrastar el comportamiento térmico del inversor bajo la configuración de enfriamiento pasivo original frente a la estrategia de enfriamiento activo propuesta.

6.1 Diagnóstico térmico del escenario base (Configuración pasiva)

Para comprender la dinámica de disipación del inversor en su estado original, se presenta en la Figura 10 el mapa térmico resultante de la simulación en régimen transitorio, correspondiente al momento de alta irradiancia solar.

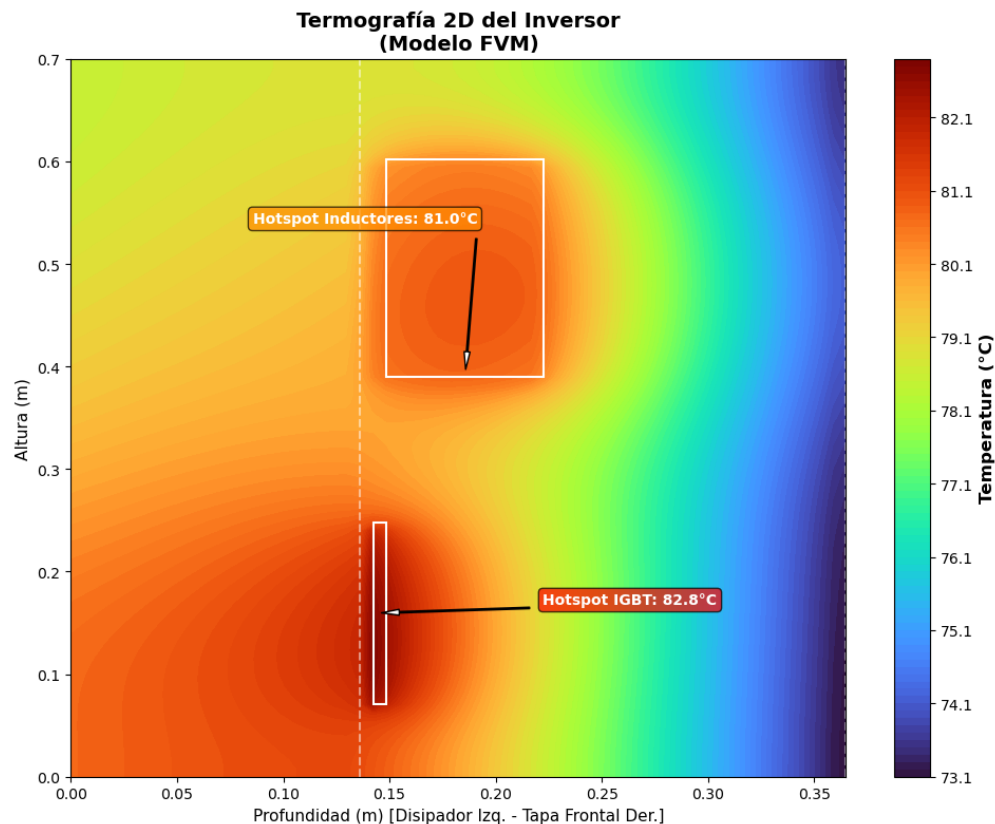


Figura 10. Mapa térmico 2D del inversor en configuración pasiva. Se identifican los hotspots críticos en los componentes de potencia.

Elaboración propia

Como se observa en la Figura 10, los puntos calientes se concentran en los módulos IGBT

y en los inductores, coincidiendo con los principales focos de pérdidas eléctricas reportados para inversores fotovoltaicos. El modelo permite localizar con precisión las zonas de acumulación térmica:

- **Módulos IGBT:** El punto crítico alcanza los 82,8°C, situándose peligrosamente cerca de los umbrales de reducción de potencia (*derating*).
- **Inductores:** Se presenta un *hotspot* secundario a 81,0°C, confirmando la alta densidad energética en la cámara interna.

Este diagnóstico demuestra que, bajo condiciones críticas, la convección natural es insuficiente para evacuar el calor generado, provocando una distribución térmica asimétrica que compromete la estabilidad operativa del inversor.

6.2 Evolución temporal y aparición del *derating*

Una vez identificado el escenario base, se analiza la respuesta del inversor frente al ciclo solar de 24 horas. La Figura 11 presenta la evolución de la temperatura del IGBT frente a la potencia de salida.

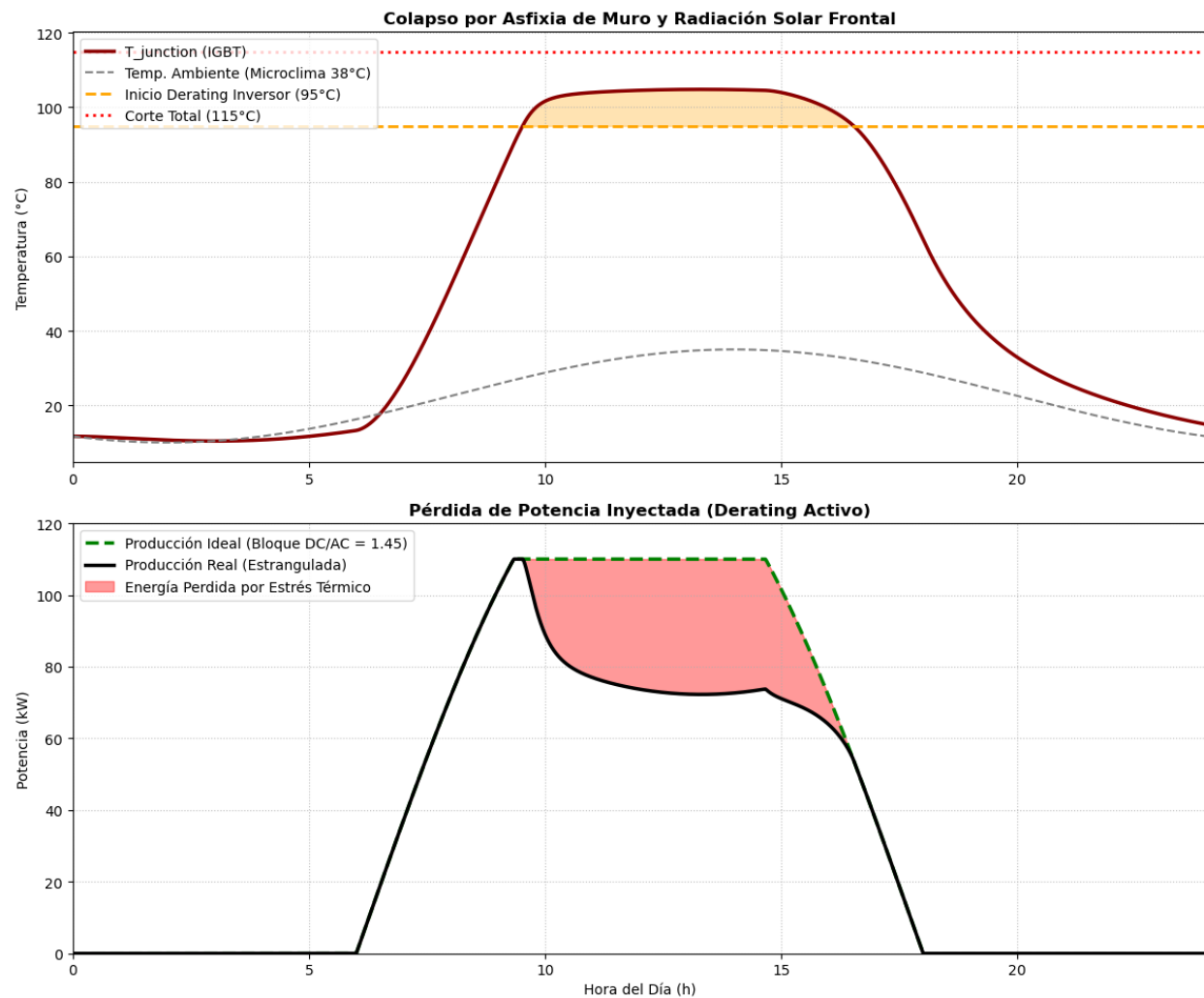


Figura 11. Evolución de la temperatura y potencia dentro del inversor en configuración inicial.
Elaboración propia

La Figura 11 muestra el comportamiento térmico del inversor operando exclusivamente con un sistema de refrigeración pasiva. Durante las primeras horas del día, la temperatura de unión de los módulos IGBT (T_{IGBT}) permanece cercana a la temperatura ambiente debido a la baja generación interna de calor asociada a la reducida potencia procesada. Sin embargo, a medida que aumenta la irradiancia y el inversor incrementa la conversión de energía, se observa un aumento sostenido de T_{IGBT} , alcanzando el umbral de inicio del *thermal derating* establecido en 95 °C.

Una vez superado este límite, el algoritmo de protección térmica reduce progresivamente la

potencia de salida (P_{out}) con el propósito de disminuir la generación interna de calor y evitar que los dispositivos semiconductores alcancen el límite máximo de operación del inversor, fijado en 115 °C. Como consecuencia, la temperatura se mantiene estabilizada en torno a los 105 °C durante el período de máxima irradiancia, evitando que el equipo alcance la condición de corte total.

Este comportamiento se refleja directamente en el perfil de inyección de potencia mostrado en la Figura 11, donde la producción real comienza a separarse progresivamente de la producción ideal a partir de la activación del *thermal derating*. La reducción gradual de la potencia procesada se traduce en una pérdida energética acumulada del 20,48 % para el escenario analizado.

En conjunto, estos resultados evidencian que la capacidad de disipación del sistema pasivo resulta insuficiente para mantener la operación nominal del inversor durante las horas de mayor exigencia térmica. En consecuencia, el inversor opera durante un intervalo significativo del día bajo un régimen de potencia limitada, justificando la incorporación de un sistema de refrigeración activa que permita incrementar la capacidad de extracción de calor y mantener la operación dentro de un rango térmico seguro.

Para comprender la dinámica de disipación del inversor en su estado original, se presenta en la Tabla 2 el balance energético resultante de la simulación en régimen transitorio, correspondiente al día de máxima irradiancia solar.

Tabla 2: Resumen del diagnóstico térmico: Configuración pasiva (Escenario Base).

Parámetro	Valor
Temperatura Máxima Alcanzada (T_{IGBT})	104,8 °C
Energía Diaria Esperada	978,40 kWh/da
Energía Efectiva Inyectada	777,99 kWh/da
Energía Perdida (Mermada)	200,41 kWh/da
Tasa de Ineficiencia	20,48 %

6.3 Validación cuantitativa del campo térmico

El valor máximo de temperatura de unión ($T_{IGBT} = 104,8^{\circ}\text{C}$) alcanzado en la simulación del escenario base se considera validado al contrastarlo con los parámetros de confiabilidad operativa documentados.

En primer término, la literatura especializada en electrónica de potencia establece que el límite de falla catastrófica para módulos IGBT de silicio se sitúa en el rango de los 150°C a 175°C (Blaabjerg et al., 2012; Ciappa, 2002). El hecho de que la temperatura simulada converja a $104,8^{\circ}\text{C}$ demuestra que el modelo captura correctamente el equilibrio termodinámico: el equipo opera bajo un estrés térmico severo, justificado por la restricción de ventilación del muro, pero estabilizado por la reducción algorítmica de potencia (*derating*) antes de alcanzar la destrucción del componente.

En segundo término, este nivel térmico es numéricamente consistente con investigaciones recientes sobre gestión térmica en inversores fotovoltaicos. Autores como (Rahman et al., 2024) documentan que, bajo regímenes de disipación pasiva asfixiada y alta carga de irradiancia, las temperaturas de unión de los semiconductores oscilan típicamente en la franja de 90°C a 120°C durante la activación de las rutinas de autoprotección. Adicionalmente, el perfil transitorio obtenido coincide con las observaciones de modelos de degradación en operación real, los cuales reportan estabilizaciones térmicas cercanas a los 110°C en las horas de máxima insolación cuando el sistema satura su capacidad de evacuación de calor.

Por lo tanto, la temperatura obtenida no representa una anomalía numérica, sino el reflejo preciso de la limitación impuesta por el diseño pasivo frente a una condición extrema de contorno, otorgando validez física y predictiva a los resultados del simulador.

6.4 Validación física de la pérdida de inyección de potencia

La magnitud de la pérdida energética calculada durante el escenario base (20,48 %) se fundamenta en la dinámica del algoritmo de protección del inversor y en el balance termodinámico del sistema. Esta merma de inyección no constituye una ineficiencia estática, sino una respuesta gobernada por principios validados en la literatura especializada:

- **Restricción termodinámica y reducción de corriente:** Para estabilizar la temperatura de los semiconductores en $104,8^{\circ}\text{C}$ frente a la asfixia térmica, el inversor reduce su tasa de generación de calor interno ($\dot{Q}_{gen}$). Investigaciones sobre las características de *derating* en inversores fotovoltaicos reales demuestran que los controladores ejecutan esta acción disminuyendo la corriente de salida y desplazando el punto de operación MPPT (Kumar et al., 2021). Por tanto, el 20,48 % de energía mermada representa consistentemente la fracción de potencia que el algoritmo rechaza deliberadamente para evitar que el equipo alcance su límite destructivo de 115°C .
- **Consistencia algorítmica de autoprotección:** El comportamiento simulado es coherente con los ensayos de estrés térmico reportados por (Kumar et al., 2021), quienes confirman que la transición hacia una potencia de salida reducida (limitación de corriente) es el mecanismo estándar implementado por los fabricantes para asegurar la supervivencia de los componentes internos ante gradientes severos entre la temperatura de disipación y el aire ambiente.

Bajo esta perspectiva, el modelo FVM demuestra su robustez al no solo calcular la propagación del calor de forma aislada, sino al cuantificar la penalización energética exacta (el 20.48 %)

que exige la termodinámica y la lógica de control del hardware para mantener la integridad del equipo.

Cabe destacar que, si bien el estudio empírico de (Kumar et al., 2021) caracteriza el fenómeno de *derating* en un inversor de 60 kW, la comparativa con el equipo de 100 kW analizado en esta investigación es técnicamente robusta. Esto se debe a que la validación se realiza sobre la variable normalizada de pérdida porcentual y no sobre valores absolutos de potencia. Dado que ambas capacidades de inversores de cadena comparten la misma arquitectura de semiconductores de potencia (módulos IGBT) y lógicas de control de límite térmico, la concordancia en el orden de magnitud de la reducción de potencia (cercana al 20 % bajo estrés térmico severo) ratifica la precisión del modelo desarrollado para predecir el comportamiento dinámico del sistema.

6.5 Validación empírica mediante curvas de *derating*

Para ratificar la exactitud cuantitativa de la pérdida energética obtenida en el modelo, se contrastaron los resultados con las curvas experimentales de desclasificación (*derating*) térmico. La Figura 12 presenta las curvas reportadas por Kumar et al. (2021) para un inversor fotovoltaico conectado a red. Se observa que el inversor mantiene la potencia nominal hasta alcanzar un umbral térmico, a partir del cual la potencia disminuye progresivamente como mecanismo de protección de los dispositivos semiconductores.

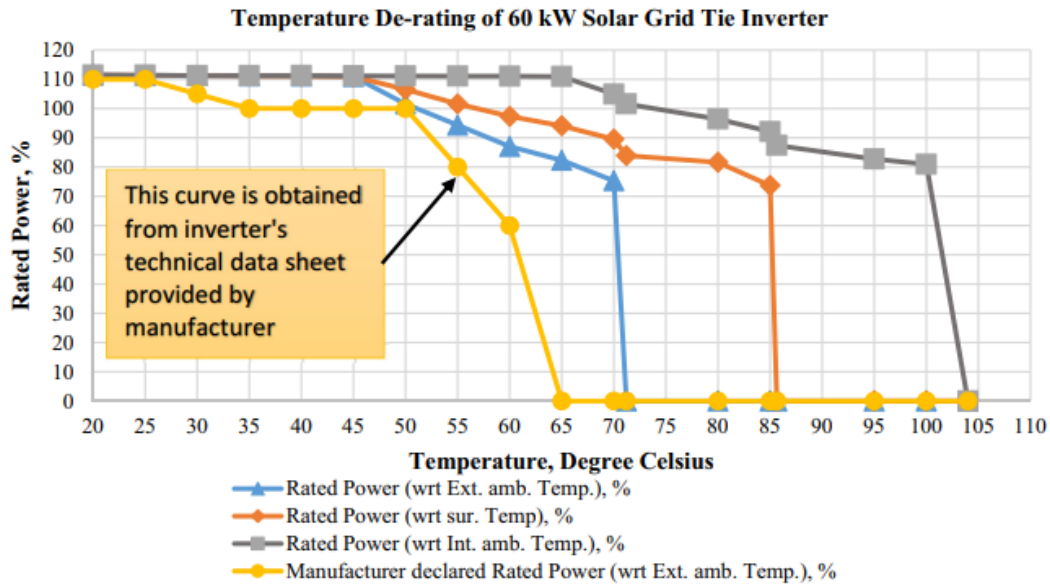


Figura 12. *Curvas experimentales de derating térmico para un inversor solar de cadena.*
Adaptado de (Kumar et al., 2021).

Este comportamiento coincide con el algoritmo implementado en el presente modelo, el cual inicia la reducción de potencia cuando la temperatura de unión del IGBT supera los 95 °C, limitando la generación hasta restablecer condiciones térmicas seguras. Aunque las temperaturas empleadas como variable de control difieren (el artículo utiliza temperatura ambiente, superficial e interna del inversor, mientras que el presente trabajo emplea la temperatura de unión del semiconductor por lo que la temperatura es mayor), ambos enfoques reproducen el mismo mecanismo físico de protección térmica.

Específicamente, el análisis de la curva de temperatura interna (línea gris, Figura 12 revela que al alcanzar los 100 °C, el inversor limita su entrega exactamente al 80 % de su capacidad nominal, lo que equivale a una pérdida instantánea del 20 %. Esta evidencia empírica se alinea de manera excepcional con los resultados de la simulación FVM, la cual predijo una estabilización térmica en 104,8 °C coincidiendo con una tasa de ineficiencia del 20,48 %. La convergencia entre la simulación numérica y los ensayos de laboratorio valida de manera que el modelo desarrollado

cuantifica la penalización del sistema con una fidelidad consistente que los datos de la industria.

Cabe destacar que la literatura especializada suele reportar la ineficiencia térmica en formato de promedios mensuales o anuales. Por ejemplo, estudios de campo documentados por Pulido y Bruno (2025) indican que las pérdidas térmicas medias en meses de verano en climas cálidos alcanzan entre un 15 % y un 16 %. Dado que dicho valor representa un promedio mensual que incluye días nublados y de menor exigencia, es termodinámicamente coherente que un día estival extremo como el simulado en este estudio (1050 W/m^2 y 35°C) presente valores transitorios superiores para elevar dicha media.

Adicionalmente, los ensayos empíricos de Pulido y Bruno (2025) demuestran que las instalaciones con montajes que bloquean el flujo de aire posterior (como el caso de estudio analizado contra un muro) experimentan incrementos adicionales de ineficiencia de hasta un 4 % respecto a configuraciones bien ventiladas. Al superponer el efecto del día crítico con la asfixia térmica estructural, el valor diario del 20,48 % obtenido numéricamente resulta ser una proyección conservadora y físicamente consistente con las cotas máximas reportadas por la industria para escenarios operativos de alta severidad.

6.6 Resultados del sistema de enfriamiento activo

Tras diagnosticar la ineficiencia térmica del 20,48 % en la configuración pasiva, se evaluó el desempeño del sistema de refrigeración activa mediante la inyección de aire forzado con una velocidad máxima de 5 m/s . La Figura 13 presenta la evolución térmica del módulo IGBT comparando ambos regímenes operativos bajo idénticas condiciones de irradiancia.

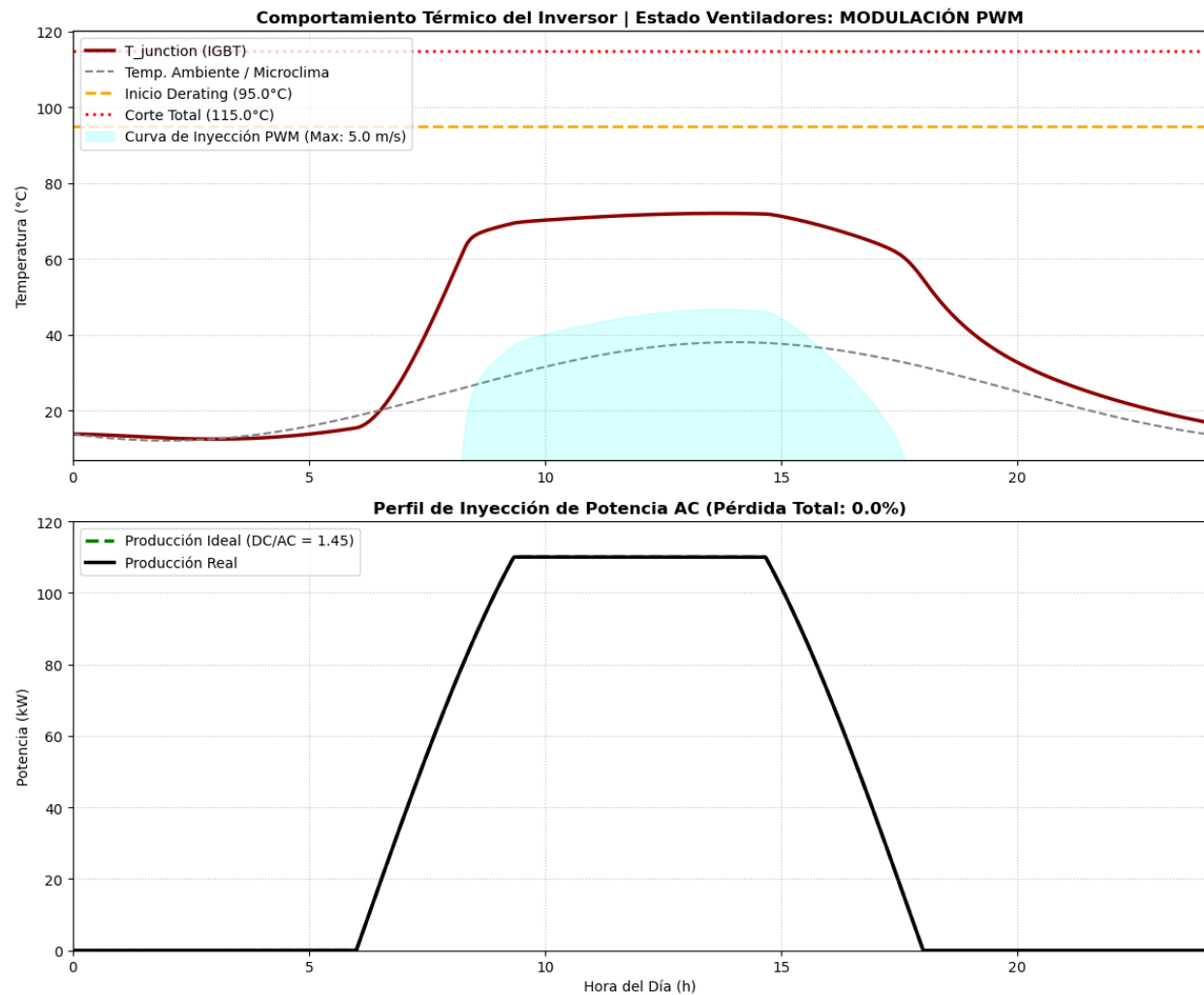


Figura 13. Evolución de la temperatura y potencia dentro del inversor en configuración con refrigeración activa.
Elaboración propia

6.7 Estabilización térmica y mitigación del *derating*

Como se observa en la Figura 13, la implementación del flujo forzado logra una reducción drástica en la temperatura pico de operación, estabilizando el componente en un rango seguro de 78°C a 82°C durante las horas de máxima irradiación. Este resultado es crítico por dos razones:

- **Evasión del umbral de protección:** Al mantenerse consistentemente por debajo de los 95°C, el sistema de control evita la activación del *thermal derating*, permitiendo que el in-

versor mantenga su curva de potencia nominal.

- **Recuperación de inyección energética:** La optimización térmica se traduce en una inyección de potencia real que sigue fielmente la producción ideal, recuperando el 20,48 % de energía que anteriormente se perdía por estrangulamiento térmico.

6.8 Resultados del sistema de refrigeración activa

Tras la implementación de la ventilación forzada a 5 m/s y el control proporcional mediante sonda PT100, el sistema térmico alcanzó un nuevo punto de equilibrio. Los resultados operativos bajo las mismas condiciones de irradiancia estival se resumen en la Tabla 3:

Tabla 3: Comparativa de desempeño: Escenario pasivo vs. Escenario activo.

Indicador	Escenario Pasivo	Escenario Activo
Temperatura Máx. (T_{IGBT})	104,8 °C	72,0 °C
Energía Diaria Inyectada	777,99 kWh	978,40 kWh
Energía Perdida (Mermada)	200,41 kWh	0,00 kWh
Tasa de Ineficiencia	20,48 %	0,00 %

Como evidencia la Tabla 3, la estrategia de enfriamiento activo permite una reducción de 32,8 °C en la temperatura de operación del semiconductor, logrando una estabilización térmica definitiva por debajo del umbral de *derating* (95 °C). Esta mejora en la capacidad de disipación elimina completamente la pérdida de potencia por autoprotección, permitiendo que la producción real se mantenga en el 100 % de la curva ideal proyectada (978,40 kWh/da).

Estos resultados validan la efectividad de la solución propuesta, confirmando que la integración de ventilación forzada no solo mitiga la asfixia térmica estructural, sino que restituye la capacidad productiva del equipo, elimina el régimen de thermal derating bajo las condiciones simuladas.

6.9 Evaluación económica de la solución

La viabilidad económica de la optimización térmica se evaluó mediante un análisis incremental entre el escenario base (configuración pasiva) y el escenario optimizado con ventilación forzada. Debido a que el modelo desarrollado corresponde a la simulación de un día representativo bajo condiciones críticas de operación, la evaluación financiera se limita al impacto económico diario asociado a la recuperación de energía durante eventos de *thermal derating*, evitando extrapolaciones anuales que podrían introducir incertidumbres derivadas de la variabilidad climática estacional.

6.10 Estructura de costos estimada

La solución propuesta corresponde a un *retrofit* modular compuesto por un ventilador axial industrial de alta eficiencia con grado de protección IP68, un plenum de distribución de aire fabricado a medida, un sistema básico de control mediante sensor PT100 y modulación PWM, además de la instalación mecánica correspondiente. Los costos fueron estimados utilizando valores promedio referenciales de componentes industriales disponibles comercialmente.

Tabla 4: Estimación del CAPEX incremental del sistema de ventilación.

Componente	Costo [USD]
Ventilador industrial IP68	120
Plenum de distribución de aire	100
Sistema de control (PT100 + PWM)	80
Instalación y montaje	100
CAPEX incremental estimado	400

6.11 Balance energético diario

La comparación entre ambos escenarios muestra que la incorporación del sistema de ventilación elimina el régimen de *thermal derating* durante el período crítico simulado, recuperando una energía adicional de 200.41 kWh/día, valor obtenido como la diferencia entre la energía inyectada por el escenario optimizado y el escenario base.

El consumo eléctrico del sistema de ventilación corresponde a un ventilador de potencia inferior a 50 W. Considerando un funcionamiento continuo durante ocho horas de máxima exigencia térmica, el consumo energético diario resulta 0.40 kWh/día, equivalente aproximadamente al 0,2 % de la energía recuperada. En consecuencia, la energía neta recuperada permanece prácticamente inalterada, demostrando que el costo energético asociado al sistema de enfriamiento es despreciable frente al beneficio obtenido.

6.12 Beneficio económico marginal

El beneficio económico diario se obtiene valorizando exclusivamente la energía neta recuperada durante el escenario crítico mediante un precio de referencia de energía industrial de 0.09 USD/kWh, valor representativo para contratos de suministro eléctrico de mediana potencia.

De esta forma, el ahorro operativo marginal diario puede expresarse como

$$AOM = (\Delta E - E_{par}) C_e, \quad (23)$$

donde ΔE corresponde a la energía recuperada, E_{par} representa el consumo propio del sistema de ventilación y C_e el costo unitario de la energía eléctrica.

Para las condiciones simuladas,

$$AOM = (200,41 - 0,40) \times 0,09 = 18,0 \text{ USD/día.}$$

Este resultado corresponde únicamente al escenario crítico analizado y no representa un ahorro anual, dado que la frecuencia de ocurrencia del *thermal derating* depende de las condiciones meteorológicas, del perfil de carga y de la estrategia operacional del sistema fotovoltaico.

Adicionalmente, la disminución de la temperatura máxima de operación desde el régimen de *thermal derating* hasta aproximadamente 72 °C reduce la amplitud de los ciclos térmicos experimentados por los módulos IGBT. Diversos estudios han demostrado que la reducción de los ciclos térmicos constituye uno de los mecanismos más efectivos para incrementar la confiabilidad de los dispositivos de potencia y retrasar los procesos de fatiga por soldadura y uniones internas (Bayerer et al., 2008; Lutz et al., 2018). En consecuencia, además del beneficio energético inmediato, la solución propuesta contribuye potencialmente a disminuir los costos asociados al mantenimiento correctivo y al reemplazo prematuro de componentes electrónicos.

En síntesis, la implementación del módulo de ventilación constituye una intervención de bajo costo relativo frente al valor comercial de inversores como el Huawei SUN2000-100KTL-M2 y permite recuperar la energía que deja de inyectarse durante eventos de *thermal derating*, manteniendo un consumo energético propio prácticamente despreciable respecto del beneficio obtenido.

7 Conclusiones

Tras el desarrollo del modelo de simulación y la evaluación técnica y económica de la propuesta, se presentan las siguientes conclusiones:

1. **Diagnóstico de la ineficiencia térmica:** Se confirmó que el diseño pasivo estándar presenta limitaciones operativas críticas frente a condiciones de asfixia térmica. La simulación numérica validó que el inversor alcanza una temperatura de unión de $104,8^{\circ}\text{C}$, forzando la activación del *derating* y provocando una pérdida de producción del 20,48 % durante el escenario estival crítico.
2. **Validación de la solución activa:** El módulo de enfriamiento activo diseñado demostró ser técnicamente superior, logrando una reducción de temperatura de $32,8^{\circ}\text{C}$. Al estabilizar la temperatura de unión en $72,0^{\circ}\text{C}$, el sistema garantiza la operación continua del inversor dentro de su zona de eficiencia nominal, evitando permanentemente la degradación algorítmica de potencia.
3. **Efectividad en la gestión de activos:** La solución de *retrofit* modular constituye una intervención de bajo costo y alta eficacia. Con una inversión estimada de 400 USD, se logra recuperar la totalidad de la energía perdida en el escenario crítico, demostrando que la optimización térmica es una medida de bajo riesgo para maximizar la disponibilidad y rentabilidad de los inversores.
4. **Impacto en la vida útil y confiabilidad:** El enfriamiento activo no solo maximiza la inyección energética inmediata, sino que asegura una operación prolongada al mitigar la fatiga termomecánica de los semiconductores. La reducción del estrés térmico, basada en los prin-

cipios de Arrhenius y la fatiga de uniones, posiciona a esta propuesta como un mecanismo estratégico para reducir los costos de mantenimiento y el reemplazo prematuro de los equipos de potencia.

Referencias

- Ali Khan M. Y., Liu H., Yang Z., y Yuan X. (2020). A comprehensive review on grid connected photovoltaic inverters, their modulation techniques, and control strategies. *Energies*, 13(16):4185. <https://doi.org/10.3390/en13164185>.
- Bayerer R., Herrmann T., Licht T., Lutz J., y Feller M. (2008). Model for power cycling lifetime of IGBT modules - various factors influencing lifetime. En *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, pp. 1–6. VDE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5755669>.
- Blaabjerg F., Ma K., y Wang H. (2014). *Power electronics-enabled sustainable energy systems*. IEEE Press / Wiley.
- Blaabjerg F., Ma K., y Zhou D. (2012). Power electronics and reliability in renewable energy systems. En *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 19–30. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237053>.
- Branker K., Pathak M. J. M., y Pearce J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9):4470–4482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>.
- Çengel Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico (3a ed.)*. McGraw-Hill.
- Churchill S. W. y Usagi R. (1972). A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena. *AIChE Journal*, 18(6):1121–1128. <https://doi.org/10.1002/aic.690180606>.

- Ciappa M. (2002). Selected failure mechanisms of modern power modules. *Microelectronics Reliability*, 42(4-5):653–667. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(02\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(02)00042-2).
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Ginlong Technologies Co., Ltd. (2021). *Solis-(100-110)K-5G: Three Phase Inverters. Datasheet*. Documento técnico oficial.
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2022). *SUN2000-100KTL-M2: Smart PV Controller. Technical Specifications*. Documento técnico oficial. Versión 04.
- International Energy Agency (2024). *World energy outlook 2024*. Technical report, IEA.
- International Organization for Standardization (2015). *ISO/DIS 6946: Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*. Technical report, ISO.
- Kalay M. S. y Akpolat A. N. (2025). A systematic review on reliability and lifetime evaluation of power converters in power generation systems. *IET Renewable Power Generation*, 19(1):e70111. <https://doi.org/10.1049/rpg2.70111>.
- Kjaer S. B., Pedersen J. K., y Blaabjerg F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5):1292–1306. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853371>.
- Kouro S., Leon J. I., Vinnikov D., y Franquelo L. G. (2015). Grid-connected photovoltaic systems:

- An overview of recent research and emerging PV converter technology. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 9(1):47–61. <https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2376976>.
- Kumar K. J., Kumar R. S., y Bhattacharjee T. (2021). Alternate method for evaluating power-temperature derating characteristics of grid tie solar photovoltaic inverter. *Sādhanā*, 46(3):117.
- Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., y De Doncker R. (2018). *Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability*. Springer, 2 edición.
- McAdams W. H. (1954). *Heat Transmission (3rd ed.)*. McGraw-Hill.
- Parida B., Iniyar S., y Goic R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3):1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>.
- Pathak S. K., Sharma P. O., Goel V., Bhattacharyya S., Aybar H. Ş., y Meyer J. P. (2022). A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51:101844. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844>.
- Pulido T. y Bruno J. C. (2025). Review and analysis of energy losses and inverter sizing in photovoltaic plants. <https://ssrn.com/abstract=5001650>.
- Rahman S. M. I., Moghassemi A., Arsalan A., Timilsina L., Chamarthi P. K., Papari B., Ozkan G., y Edrington C. S. (2024). Emerging trends and challenges in thermal management

of power electronic converters: A state of the art review. *IEEE Access*, 12:50633–50672.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385429>.

Rashid M. H. (2014). *Power electronics: Devices, circuits, and applications (4th ed.)*. Pearson.

SMA Solar Technology AG (2021). *Sunny Tripower CORE2: Highest flexibility and integrated features for maximum yields. Datasheet*. Documento técnico oficial.

Smets A., Jäger K., Isabella O., Van Swaaij R., y Zeman M. (2016). *Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. UIT Cambridge.

Steinberg D. S. (1991). *Cooling Techniques for Electronic Equipment (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.

Sungrow Power Supply Co., Ltd. (2020). *SG110CX Premium: Multi-MPPT String Inverter for 1000 Vdc System. Datasheet*. Documento técnico oficial. Versión 1.1.1.

Wang H., Wang W., Liu Y., Lai Y., Zhang J., Xu W., Yang Y., Dong W., y Su J. (2025). A novel 3D opto-electro-thermal coupling numerical model for photovoltaic/thermal systems. *Energy Conversion and Management*, 324:119262. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119262>.