

Disminución de la brecha tecnológica en refrigeración solar por adsorción: criterios de diseño y selección de materiales para la integridad operativa


Narrowing the technology gap in solar adsorption cooling: design criteria and material selection for operational integrity

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.c.04.22>


Luis Ávila-Lubo

 Universidad de Antioquia - Medellín, Colombia


 luis.avila.lubo@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6865-4252>


Gail Gutiérrez-Ramírez

 Universidad de La Guajira, Riohacha - La Guajira, Colombia


 galbeirog@uniguajira.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-6865-4252>

Gloria Restrepo-Vásquez

 Universidad de Antioquia - Medellín, Colombia

 gloria.restrepo1@udea.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-6865-4252>

Resumen

La refrigeración solar por adsorción física enfrenta una brecha tecnológica crítica que impide la transición efectiva del diseño teórico a la construcción de prototipos funcionales, debido principalmente a la desatención de la degradación material y la pérdida de estanqueidad en entornos operativos reales. El objetivo de este ensayo es establecer criterios técnicos de selección de materiales que garanticen la integridad operativa del sistema utilizando el par carbón activado-metanol, integrando la termodinámica con la ciencia de materiales. La metodología empleada consistió en una investigación documental de carácter analítico-crítico, fundamentada en una revisión narrativa de literatura científica de alto impacto publicada entre 2019 y 2026, auditada mediante una matriz de extracción de metadatos. Los hallazgos de la literatura a partir de la revisión permiten inferir que la estabilidad del vacío y la eficiencia de la transferencia de calor son directamente dependientes de la mitigación de la corrosión atmosférica y del uso de aleaciones específicas, como el acero inoxidable AISI 316L, junto con sellos de alta resistencia térmica para prevenir el ingreso de gases incondensables. Se concluye que la disminución de la brecha tecnológica es científicamente viable al tratar la resistencia ambiental no como un factor periférico, sino como una restricción funcional primaria. Esta alineación entre la eficiencia del ciclo y la fiabilidad estructural fundamenta una ruta de diseño robusta para la



manufactura de refrigeradores solares sostenibles, favoreciendo su durabilidad y viabilidad económica en condiciones climáticas exigentes.

Palabras clave: *control de calidad, conversión de energía, energía solar, energía térmica, materiales de construcción.*

Abstract

Solar physical adsorption refrigeration faces a critical technological gap that hinders the effective transition from theoretical design to the construction of functional prototypes, primarily due to the neglect of material degradation and the loss of airtightness in real operational environments. The objective of this study is to establish technical material selection criteria that guarantee the system's operational integrity using the activated carbon-methanol pair, integrating thermodynamics with materials science. The methodology consisted of analytical-critical documentary research, based on a narrative review of high-impact scientific literature published between 2019 and 2026, audited through a metadata extraction matrix. The findings from the literature review suggest that vacuum stability and heat transfer efficiency are directly dependent on the mitigation of atmospheric corrosion and the use of specific alloys, such as AISI 316L stainless steel, combined with high thermal resistance seals to prevent the ingress of non-condensable gases. It is concluded that narrowing the technological gap is scientifically viable by treating environmental resistance not as a peripheral factor, but as a primary functional constraint. This alignment between cycle efficiency and structural reliability establishes a robust design route for the manufacturing of sustainable solar refrigerators, enhancing their durability and economic viability under demanding climatic conditions.

Keywords: *solar energy, thermal energy, energy conversion, construction materials, quality control.*

INTRODUCCIÓN

En comunidades con alta dispersión poblacional y con acceso limitado a infraestructuras energéticas convencionales, la refrigeración constituye un servicio esencial para la preservación de la salud pública y la seguridad alimentaria [1]. En estos territorios, la conservación de medicamentos e insumos alimentarios depende de la continuidad de la cadena de frío, de modo que la disponibilidad de energía deja de representar únicamente una condición de confort doméstico y pasa a constituir un factor estructural para la sostenibilidad de actividades socio productivas y para la atención de necesidades básicas [2].

La pertinencia de una tecnología de refrigeración en contextos descentralizados no depende exclusivamente de su capacidad para generar enfriamiento, sino de su respuesta frente a condiciones reales de operación [3]. Entre estas condiciones se encuentran la intermitencia en el suministro energético, la variabilidad climática, las limitaciones de mantenimiento y la necesidad de preservar el desempeño ante pérdidas térmicas y procesos de degradación material [3]. En consecuencia, la evaluación de alternativas tecnológicas debe

fundamentarse en evidencia obtenida bajo condiciones de campo o en climas representativos, con el fin de asegurar que las decisiones de diseño respondan a exigencias operativas reales y no únicamente a supuestos ideales de laboratorio [4].

En este marco, la refrigeración solar por adsorción física se reconoce como una alternativa técnicamente pertinente para aplicaciones fuera de red, debido a que aprovecha energía térmica solar y reduce la dependencia de suministro eléctrico continuo [5]. Dentro de estas configuraciones, el par carbón activado-metanol ha sido estudiado mediante ensayos experimentales, modelaciones y evaluaciones aplicadas que reportan su desempeño en condiciones climáticas reales y en escenarios orientados a comunidades dispersas, lo que respalda su potencial para atender necesidades de frío bajo criterios de diseño ajustados al contexto [5], [6], [7], [8]. A ello se suma su interés ambiental, asociado al empleo de un refrigerante natural y a la posibilidad de prescindir de compresores eléctricos, favoreciendo esquemas de refrigeración con menor dependencia energética y menor huella ambiental frente a soluciones convencionales [9].

A pesar de la pertinencia del ciclo de refrigeración por adsorción para aplicaciones fuera de red, persiste una brecha tecnológica que limita la transición desde el diseño teórico hacia la construcción de prototipos funcionales y duraderos. La literatura reporta de manera reiterada una diferencia entre los valores de desempeño obtenidos en modelos analíticos (> 0.50) y los resultados más modestos observados en pruebas de campo ($= 0.29-0.35$), lo que pone en evidencia que la viabilidad del sistema no depende exclusivamente de la termodinámica del par adsorbente-refrigerante [10], [11]. En este escenario, la pérdida de estanqueidad en condiciones cercanas al vacío, la presencia de gases incondensables y la degradación de las interfases térmicas por corrosión y ensuciamiento emergen como factores críticos que deterioran el comportamiento real del equipo y amplían la distancia entre el rendimiento esperado y el alcanzado en operación [12], [13].

Frente a esta brecha, el presente manuscrito propone una ruta de diseño orientada por la integración de la ciencia de materiales con la fenomenología del ciclo de adsorción. El trabajo se centra en formular criterios técnicos verificables por componente, priorizando la inercia química, la estabilidad mecánica y la preservación de las condiciones de frontera que sostienen el desempeño termodinámico del sistema. Desde esta perspectiva, la selección de materiales deja de asumirse como una decisión auxiliar de fabricación y pasa a constituirse en un factor determinante para asegurar que el comportamiento del reactor mantenga coherencia con los supuestos del modelo. Bajo este enfoque, el ensayo aporta una base argumentativa para orientar el escalamiento de sistemas de refrigeración solar más sostenibles, duraderos y resilientes en condiciones climáticas exigentes.

MÉTODO

El presente ensayo se desarrolla bajo un enfoque de investigación documental de carácter analítico-crítico, fundamentado en una revisión narrativa de la literatura científica reciente (2019-2026). El procedimiento metodológico se ha diseñado para transitar desde la identificación de parámetros teóricos hasta la síntesis de criterios constructivos, garantizando la auditabilidad del proceso mediante tres fases de contrastación lógica.

Fase 1: Categorización y determinación de parámetros base

Se estableció un marco de referencia. Esta fase tuvo como propósito identificar las variables críticas de diseño: (i) parámetros cinéticos y de equilibrio del par carbón activado-metanol, (ii) restricciones funcionales de transferencia de calor y (iii) factores de degradación ambiental. Estos elementos constituyeron los descriptores de búsqueda para la fase siguiente.

Fase 2: Extracción y auditoría de evidencia bibliográfica

Para recolectar la información necesaria que permita cerrar la brecha tecnológica, se conformó un corpus de 26 artículos científicos. La selección de estos documentos se rigió por criterios de actualidad y relevancia técnica en multiescala y ciencia de materiales. Se empleó una tabla de clasificación de fuentes por función para auditar cada hallazgo (Tabla 1), clasificando la información en: datos termodinámicos, soluciones de ingeniería de materiales y métodos de protección contra la corrosión atmosférica. Este paso es fundamental para asegurar que las conclusiones del ensayo se sustenten en evidencia externa verificable y no en supuestos empíricos.

Fase 3: Contrastación documental

Para consolidar la postura del ensayo, se procedió a la contrastación de la literatura técnica con los requerimientos de construcción física. Este proceso de síntesis permitió determinar la viabilidad de los nuevos materiales reportados frente a las exigencias de operación real. El análisis final se centró en la integración de estos hallazgos para formular una hoja de ruta teórica que disminuya la brecha tecnológica actual, cumpliendo con el rigor metodológico de no reportar resultados originales, sino deconstruir el conocimiento existente para su aplicación en el diseño de refrigeradores solares por adsorción. Para mantener auditabilidad, las fuentes se clasifican por función dentro del argumento (Véase Tabla 1), evitando mezclar evidencia aplicada con supuestos de diseño no sustentados [14].

Tabla 1

Clasificación de fuentes y criterios de selección documental por función

Elemento	Definición operativa	Propósito	Evidencia
Aplicaciones	Estudios de sistemas solares por adsorción con carbón activado–metanol	Identificar arquitecturas, variables operativas y retos reportados	[15], [16], [17], [18], [19], [20].
Fenomenología	Isotermas/equilibrio, cinética, resistencias térmicas y difusivas	Explicar mecanismos que condicionan desempeño del ciclo	[5], [21], [22], [23], [24], [25]
Modelación	Modelos termodinámicos/lumped, contrastación numérica desde literatura	Justificar criterios de dimensionamiento sin resultados propios	[5], [23], [26], [27], [28]
Materiales y compatibilidad	Corrosión atmosférica, compatibilidad metanol–materiales, sellado/estanqueidad	Derivar criterios de selección de materiales resistentes	[23], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37]

DESARROLLO

Par carbón activado–metanol y restricciones de frontera

La selección del par Carbón Activado–Metanol para la producción de hielo en la Alta Guajira no responde a una preferencia de diseño, sino a una restricción termodinámica de exclusión. Aunque la literatura reporta pares con mayores calores de adsorción, como Zeolita-Agua o Silica Gel-Agua, la revisión crítica [17], [18] confirma que estos están físicamente inhabilitados para aplicaciones de congelación debido al punto de solidificación del agua (0°C). En contraste, el metanol permite temperaturas de evaporación sub-cero ($T_{evap} \approx -5^{\circ}\text{C}$ a -10°C) impulsadas por temperaturas de regeneración bajas ($< 100^{\circ}\text{C}$), posicionándose como la única configuración fisicoquímica capaz de acoplar la cadena de frío requerida con la captación solar de baja entalpía disponible en la región.

Sin embargo, esta ventaja operativa impone un límite de diseño estricto ("*Hard Constraint*"): la temperatura de regeneración no debe exceder los 120°C debido al riesgo de descomposición química del metanol [20]. Esta condición de frontera descarta el uso de concentradores solares de alta potencia, validando fenomenológicamente el uso de colectores de placa plana selectiva o tubos de vacío CPC como la arquitectura óptima de captación. Para contrastar esta fundamentación teórica con la realidad operativa, se analizó la evidencia aplicada disponible (véase Tabla 1). Los reportes de prototipos solares confirman que el par es capaz de producir hielo, pero evidencian una alta sensibilidad a la arquitectura del sistema y a las pérdidas térmicas:

Tabla 2

Evidencia aplicada reportada para sistemas de adsorción solar con carbón activado–metanol

Fuente	Configuración	Evidencia	Indicadores	Condición térmica
[16]	Sistema a gran escala para zonas rurales, operación sin electricidad.	Reporta formación efectiva de hielo en ciclos diurnos.	COP del primer ciclo ≈ 0.35	Temperatura de regeneración del adsorbedor cercana a 110°C .
[38]	Análisis experimental y teórico bajo condiciones de Riohacha.	Enfría agua hasta condiciones subcero.	COP ≈ 0.38 (condición reportada).	Condiciones de radiación solar real con colector plano.
[17]	Sistema asistido por energía solar de dos lechos.	Enfriamiento útil sin carga térmica externa inicial.	COP exp ≈ 0.29 (simulación ≈ 0.35).	Temperaturas de operación limitadas por calentamiento solar.
[19]	Unidad de fabricación y enfriamiento en campo.	Enfriamiento con temperaturas bajas estables.	COP máx ≈ 0.57 ; SCP reportado.	Temperatura de lecho reportada ($\approx 115^{\circ}\text{C}$).
[20]	Optimización de diseño y simulación numérica.	Enfoque orientado a planta de hielo.	COP hasta valor alto reportado por modelación.	Condiciones climáticas ideales ingresadas al modelo.

El análisis de la Tabla 2 revela una brecha de consistencia: mientras que los modelos teóricos [20] predicen altos rendimientos, los prototipos experimentales [16], [17] muestran valores de COP más modestos (0.29–0.35). Esta discrepancia no se debe a la falla de la termodinámica del par, sino a la dificultad de mantener las condiciones ideales en un equipo real expuesto a la intemperie.

La variabilidad observada sugiere que el éxito del ciclo depende de cómo se resuelven las resistencias parásitas: fugas de vacío (estanqueidad), resistencias de contacto en el lecho y degradación de superficies. Por tanto, la viabilidad técnica en la Alta Guajira no se garantiza solo eligiendo el metanol, sino seleccionando materiales capaces de cerrar la brecha entre el desempeño teórico y el real frente a las condiciones atmosféricas.

Fenomenología y formulación multiescala: la resistencia atmosférica como condición de frontera

La viabilidad del ciclo de refrigeración solar en entornos agresivos, como la Alta Guajira, no depende únicamente de la capacidad intrínseca de adsorción del microporo ($< 2nm$), sino de la estabilidad de las condiciones de frontera que sostienen el modelo matemático a lo largo del tiempo. A diferencia de las aproximaciones estáticas convencionales, este modelo postula que la degradación de materiales altera las ecuaciones constitutivas del transporte, transformando la "resistencia atmosférica" en una restricción termodinámica activa.

a) Estanqueidad y colapso de la ecuación de estado

El ciclo se rige teóricamente por la ecuación de Dubinin-Astakhov (D-A), la cual asume que el potencial de adsorción (ϵ) depende exclusivamente de la presión de vapor del metanol. Sin embargo, la evidencia experimental confirma que el ingreso de aire por fallas en juntas o la generación de hidrógeno por corrosión interna impone una nueva condición de frontera de presión en la superficie del adsorbente (P_{surf}):

$$P_{surf} = P_{sat}(T_{evap}) + P_{inc}(t)$$

Donde $P_{inc}(t)$ es la presión parcial de incondensables que aumenta con el envejecimiento de los sellos. Matemáticamente, $P_{inc} > 0$, el potencial de adsorción se reduce drásticamente

$$\epsilon = RT \ln \left(\frac{P_{sat}}{P_{surf}} \right) \rightarrow 0,$$

generando un efecto de blanketing o bloqueo difusivo en los macroporos. Esto demuestra que la selección de materiales de sellado no es un requisito mecánico auxiliar, sino la única garantía para evitar resultados falsos al utilizar la ecuación de estado que gobierna el uptake swing [23], [25].

b) Cinética transitoria y corrección por contaminación:

Mientras que los modelos de diseño simplificados (LDF) asumen una difusividad efectiva D_e constante, la literatura reciente[22] evidencia que la presencia de impurezas reduce D_e hasta en un 98%. Para capturar esta realidad, el modelo cinético debe abandonar la constante ideal e incorporar un factor de penalización por contaminación (Φ_{cont}) vinculado a la integridad del material:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{15D_e(t)}{R_p^2} (x_{eq} - x); D_e(t) = D_0 \cdot \Phi_{cont}(t) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

Esta formulación revela que si el material del reactor permite la permeación o corrosión ($\Phi_{cont} \rightarrow 0$), la cinética del sistema se detiene asintóticamente, independientemente de la energía solar disponible. Así, el uso de acero inoxidable AISI 316L se justifica no solo por durabilidad, sino para mantener $\Phi_{cont} \approx 1$ y validar las predicciones de potencia frigorífica a los 36 meses [5].

c) Interfaces dinámicas y balance de energía en medios porosos:

La transferencia de calor en el lecho, crítica debido a la baja conductividad del carbón activado, se modela mediante la conservación de energía asumiendo Desequilibrio Térmico Local (LTNE). No obstante, en un ambiente salino, la condición de frontera térmica en la pared del colector deja de ser estática debido al fouling y la corrosión galvánica:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + (1 - \epsilon) \rho_{AC} \Delta H_{ads} \frac{\partial x}{\partial t}$$

$$\text{Condición de Frontera: } -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{1}{R_{wall} + R_{fouling}(t)} (T_s - T_{amb})$$

Donde $R_{fouling}(t)$ representa la resistencia térmica creciente por deposición salina y degradación de la interfaz aleta-tubo. La compatibilidad electroquímica se establece, por tanto, como un criterio fenomenológico: sin materiales que minimicen $R_{fouling}$, el término de fuente de calor ($\Delta H_{ads} \approx 1938 \frac{kJ}{kg}$) no puede ser evacuado eficientemente, desacoplando térmicamente el reactor y haciendo inviable el ciclo [5]

Modelación multiescala y contrastación: del ajuste numérico a la validación física

La modelación en refrigeración solar por adsorción no debe interpretarse como una herramienta de predicción de potencia (output), sino como un instrumento de diagnóstico para identificar qué resistencias físicas limitan el desempeño (input). La revisión crítica de la literatura revela una discrepancia sistemática: los modelos de parámetros concentrados (Lumped) y de Fuerza Impulsora Lineal (LDF), ampliamente utilizados por su simplicidad, fallan al predecir el comportamiento del reactor en ciclos cortos o intermitentes. La evidencia experimental demuestra que estos modelos subestiman la cinética inicial porque ignoran la difusión intrapartícula en los microporos, la cual domina la velocidad de reacción y puede reducirse hasta en un 98% ante la presencia de impurezas [22], un fenómeno que un coeficiente k_{LDF} constante no puede capturar.

Por tanto, el dimensionamiento del reactor para la Alta Guajira exige un enfoque multiescala y distribuido. Estudios recientes confirman que la baja conductividad térmica del lecho genera gradientes radiales severos que los modelos 0-D ignoran [23]. Si el modelo no resuelve espacialmente la temperatura, es imposible diseñar la separación entre aletas o el diámetro del tubo para evacuar el calor de adsorción ($\Delta H_{ads} \approx 1938 \frac{kJ}{kg}$) a la velocidad requerida. Más crítico aún es el tratamiento de las condiciones de frontera: mientras la literatura asume contacto perfecto, la validación numérica inversa realizada por Ossman [5] demuestra que el coeficiente de transferencia de calor en la pared (h_{Res}) es una variable estocástica dependiente de la calidad del

contacto mecánico. Esto implica que, sin un material resistente a la corrosión que estabilice la interfaz aleta-tubo, cualquier simulación CFD divergiría de la realidad operativa en cuestión de meses.

Finalmente, la contrastación con la literatura alerta sobre el riesgo de importar constantes empíricas. No existe un consenso universal sobre los parámetros de la ecuación de Dubinin-Astakhov (D, n, x_0) para "carbón activado" genérico; estos valores dependen intrínsecamente de la microestructura del lote y su historial de activación [5], [27]. En consecuencia, la modelación matemática en esta propuesta no sustituye la experimentación; la dirige, señalando la necesidad imperativa de caracterizar el carbón local y los coeficientes de transporte reales antes de dimensionar la masa del lecho.

La Tabla 3 actualiza la función de la modelación, pasando de una clasificación teórica a una guía de vigilancia tecnológica para el diseño:

Tabla 3

Función de la modelación multiescala y restricciones para su uso como evidencia de diseño

Nivel de modelación	Limitación fenomenológica detectada	Implicación para el diseño y selección de materiales
Modelos LDF / Lumped (Parámetros Concentrados)	Asumen cinética constante (k). Fallan al predecir la "cola" de adsorción y la sensibilidad a contaminantes [22]	No aptos para dimensionar potencia. Útiles solo para estimaciones de carga térmica global. Exigen validar la pureza del metanol en el diseño.
Modelos Distribuidos (CFD) (Navier-Stokes + Darcy)	Revelan gradientes radiales y puntos calientes. Dependen críticamente de la condición de frontera térmica (h_{wall}) [23]	Herramienta obligatoria para geometría. Definen distancia entre aletas. Validan si el material (acero inoxidable AISI 316L) permite la conducción requerida.
Estimación Inversa / Multiescala	Demuestra que los parámetros D-A (n, x_0) varían por lote y proceso de activación [5]	Justificación de la Etapa Experimental. Obliga a caracterizar el carbón local. Rechaza el uso de "datos de literatura" para el diseño final.

Nota. Elaboración propia basada en la síntesis crítica [5], [22], [23].

Criterios de selección: de la validación de laboratorio a la integridad en campo

La revisión crítica de la literatura reciente revela una dicotomía fundamental entre los prototipos académicos y los requisitos de una aplicación real en la Alta Guajira. Mientras que la selección de materiales en entornos controlados prioriza la facilidad de fabricación y el costo inmediato, la operación en campo bajo condiciones de clase corrosiva C5 exige criterios que garanticen la

estabilidad de las condiciones de frontera del modelo matemático (vacío y transferencia de calor) a largo plazo.

a) Metalurgia del reactor

La evidencia documental confirma que el estándar actual para prototipos de adsorción con metanol es el Acero Inoxidable AISI 304 [23], [30]. Sin embargo, esta selección asume implícitamente una atmósfera externa no agresiva. Para la aplicación en Manaure, donde la deposición de aerosoles de cloruro induce corrosión por picaduras (pitting), el AISI 304 representa un riesgo de fallo por pérdida de hermeticidad. Dado que la literatura clasifica al metanol como "moderadamente corrosivo" y advierte que la integridad de los tubos es crítica para evitar fugas [23], se establece como criterio de diseño la transición mandataria a acero inoxidable AISI 316L. Este material no se selecciona por "lujo", sino para mitigar el riesgo de microfisuras que elevarían la presión interna ($P_{inic} > 0$), invalidando la capacidad de adsorción predicha por la ecuación de Dubinin-Astakhov.

b) Interacción fluido-material: estabilidad de la interfaz térmica

Aunque estudios como el de Helmy [33] sugieren una corrosión despreciable del cobre en contacto con metanol en pruebas de corto plazo, la validación longitudinal es inexistente en las fuentes consultadas. En un sistema diseñado para una vida útil extendida, incluso una "corrosión moderada" genera capas de óxido que incrementan la resistencia térmica de contacto (R_{contac}), desacoplando la transferencia de calor entre el colector y el lecho. Por tanto, el criterio de selección prioriza la inercia química absoluta sobre la conductividad térmica pura, descartando aleaciones no pasivadas que puedan comprometer la eficiencia del intercambiador a lo largo del tiempo.

c) Estanqueidad y polímeros: gestión de la incertidumbre

La debilidad identificada en la literatura experimental es la contención del fluido.[23] atribuyen discrepancias en sus balances de masa a fugas no caracterizadas en el ciclo de metanol. Ante la ausencia de estudios que validen la estabilidad dimensional de elastómeros comunes (Nitrilo/EPDM) frente al metanol a $T > 100^{\circ}\text{C}$ y bajo radiación UV intensa, este diseño adopta un enfoque de seguridad por especificación: el uso exclusivo de juntas de PTFE (Teflón) o Vitón de alto grado. Esta decisión busca eliminar variables estocásticas (hinchamiento o degradación de sellos) que transformarían el sistema cerrado en uno permeable, colapsando la cinética de adsorción.

A continuación, se presenta la Tabla 4 con un resumen detallado de los materiales, de componentes mayores y menores del reactor, a partir de los riesgos reportados en la literatura.

Tabla 4

Traducción de riesgos reportados en literatura a criterios de selección de materiales para la Alta Guajira.

Componente	Práctica común en literatura (laboratorio)	Riesgo detectado / brecha	Criterio de selección propuesto (campo)	Justificación (fuente)
Carcasa del Adsorbedor	Acero Inoxidable AISI 304 [23]	Susceptibilidad a pitting por cloruros ambiente (Manaure). Pérdida de vacío.	Acero Inoxidable AISI 316L	Prevenir microfugas que eleven la presión base P_{sys} y anulen el uptake [23]
Intercambiador (Tubos/Aletas)	Cobre Aluminio estándar [33]	"Corrosión o moderada" formación óxidos aumentan R_{contac} .	Aluminio y Anodizado de Acero inoxidable AISI 316L	Priorizar estabilidad de h_{wall} sobre conductividad inicial para asegurar vida útil.
Sellos y Juntas	No especificado elastómeros genéricos.	Fugas recurrentes o reportadas en balances de masa experimental.	PTFE (Teflón) o Vitón FKM	Mitigar riesgo de hinchamiento (swelling) no caracterizado en literatura a $> 100^{\circ}\text{C}$
Conexiones	Bridas metálicas simples.	Par galvánico en ambiente salino.	Aislamiento Dieléctrico	Evitar corrosión en la unión que comprometa la hermeticidad.

Nota. Elaboración propia basada en la auditoría crítica bibliográfica [23], [30], [33]

CONCLUSIÓN

La evaluación sistemática de la literatura científica disponible permite confirmar que la brecha tecnológica para el desarrollo de sistemas de refrigeración solar por adsorción física se ha reducido de lo que favorece el desarrollo de nuevos prototipos. La convergencia entre los modelos de caracterización multiescala y el conocimiento profundo de la cinética del par carbón activado-metanol proporciona el fundamento necesario para transitar de modelos teóricos abstractos a diseños de ingeniería con alta capacidad predictiva. Esta base de datos técnica, consolidada en el periodo actual, acota la incertidumbre sobre el comportamiento del ciclo termodinámico bajo condiciones de operación variables, facilitando una construcción física fundamentada en la precisión científica y no en el ensayo y error.

Se concluye que la superación de las barreras constructivas depende de la integración de criterios de ciencia de materiales dentro de la fase de diseño del ciclo. La identificación de la degradación atmosférica y la pérdida de vacío como los principales factores de fallo funcional ha permitido que la literatura reciente proponga soluciones específicas de estanqueidad y resistencia a la corrosión. Al abordar estos factores no como imprevistos, sino como restricciones funcionales predecibles, el diseño teórico actual mejora la viabilidad de los prototipos resultantes, lo que les permite la integridad estructural necesaria para operar en ambientes climáticos agresivos, asegurando la durabilidad del sistema.

Finalmente, se establece que el avance hacia la construcción de refrigeradores solares por adsorción es técnica y científicamente viable gracias a la robustez de la evidencia bibliográfica actual. La disminución de la brecha tecnológica es el resultado de una visión transdisciplinar que alinea la eficiencia térmica con la durabilidad de los materiales. Por lo tanto, el camino hacia la implementación de estas tecnologías sostenibles queda despejado, posicionando a la revisión bibliográfica avanzada como la herramienta crítica para la toma de decisiones en la manufactura y el escalamiento de sistemas de refrigeración de baja huella de carbono.

Rol de contribución

Luis Ávila-Lubo: Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura-borrador original, escritura-revisión y edición, visualización.

Gail Gutiérrez-Ramírez: Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura-borrador original, escritura-revisión y edición, visualización.

Gloria Restrepo-Vásquez: análisis formal, investigación, escritura revisión y edición, recursos, visualización, supervisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. E. Lesala, N. Shambira, G. Makaka, and P. Mukumba, “Exploring Energy Poverty among Off-Grid Households in the Upper Blinkwater Community, South Africa,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/su16114627.
- [2] B. Marchi and S. Zanoni, “Cold Chain Energy Analysis for Sustainable Food and Beverage Supply,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811137.
- [3] O. S. Showers and S. Chowdhury, “Optimal Design and Cost-Benefit Analysis of a Solar Photovoltaic Plant with Hybrid Energy Storage for Off-Grid Healthcare Facilities with High Refrigeration Loads,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 17, Sep. 2025, doi: 10.3390/en18174596.
- [4] Y. Guo, C. Liang, H. Liu, L. Gong, M. Bao, and S. Shen, “A Review on Phase-Change Materials (PCMs) in Solar-Powered Refrigeration Systems,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en18061547.
- [5] M. Ossman, M. Siavashi, and M. Babaei, “Inverse Properties Estimation of Methanol Adsorption in Activated Carbon to Utilise in Adsorption Cooling

- Applications: An Experimental and Numerical Study,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18030714.
- [6] Z. Tamainot-Telto, S. J. Metcalf, and N. N. Yande, “Adsorption Solar Air Conditioning System for Singapore Climate,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15186537.
- [7] F. M. Makahleh, A. A. Badran, H. Attar, A. Amer, and A. A. Al-Maaitah, “Modeling and Simulation of a Two-Stage Air-Cooled Adsorption Chiller with Heat Recovery Part II: Parametric Study,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/app12105156.
- [8] F. A. Lattieff, M. A. Atiya, J. M. Mahdi, H. S. Majdi, P. Talebizadehsardari, and W. Yaïci, “Performance analysis of a solar cooling system with equal and unequal adsorption/desorption operating time,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206749.
- [9] D. Serrano-Florez, A. J. Camargo, G. Gutierrez, M. Bastidas-Barranco, E. Chica, and A. Colorado, “The Impact of Solar Radiation at Different Colombian Thermal Floors on an Adsorption Refrigeration Cycle,” *Processes*, vol. 11, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/pr11082499.
- [10] P. Donkers, K. Gao, J. Houben, H. Huinink, B. Erich, and O. Adan, “Effect of non-condensable gasses on the performance of a vacuum thermochemical reactor,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 2, 2020, doi: 10.3390/en13020362.
- [11] L. G. Gordeeva and Y. I. Aristov, “Adsorptive Systems for Heat Transformation and Heat Storage Applications,” Jan. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15020617.
- [12] L. Calabrese, W. Mittelbach, L. Bonaccorsi, and A. Freni, “An Industrial Approach for the Optimization of a New Performing Coated Adsorber for Adsorption Heat Pumps,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15145118.
- [13] E. Ponticorvo, M. Iuliano, C. Cirillo, A. Maiorino, C. Aprea, and M. Sarno, “Fouling Behavior and Dispersion Stability of Nanoparticle-Based Refrigeration Fluid,” May 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15093059.
- [14] C. Kandilli, Y. Acikbas, and M. Uzel, “Investigation of thermophysical properties of natural zeolite plates enhanced with graphite powder for thermal management of PV thermal systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 318, no. August, p. 128558, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128558.
- [15] R. M. Hannun *et al.*, “Experimental and theoretical analysis of the solar adsorption refrigeration system under south Iraq climate condition,” *Journal of Building Engineering*, vol. 89, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109226.
- [16] T. Manpho, S. Boonthavorn, T. Musika, W. Kaveevivitchai, and N. Lerkkasemsan, “A study on large-scale solar adsorption refrigeration systems for rural areas in Thailand,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 74, p. 106958, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.106958.

- [17] A. K. Krishnappa, N. Kapilan, S. Kasthuriengan, and D. P. Ashwathnarayana, “Experimental and Simulation Study of a Solar Assisted Two Bed Adsorption Refrigeration System Using Activated Carbon-Methanol,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 293–303, Apr. 2023, doi: 10.18280/ijht.410202.
- [18] J. Patel, G. Nakum, P. Mehta, and Z. Said, “Solar adsorption cooling systems for off-grid sustainability: Recent advances, design strategies, and future perspectives,” Mar. 01, 2026, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2025.108718.
- [19] N. H Al-Maamory and N. Fadel Farman, “Performance of Solar Adsorption Cooling System Using Methanol and Activated Carbon as a Working Pair,” *Journal of Engineering*, vol. 29, no. 7, pp. 71–85, Jul. 2023, doi: 10.31026/j.eng.2023.07.05.
- [20] H. A. Alamoudi and A. M. Abdel-Dayem, “Design Optimization and Simulation of an Ice Plant Working by Solar Adsorption Technology,” *European Journal of Energy Research*, vol. 1, no. 4, pp. 13–22, Oct. 2021, doi: 10.24018/ejenergy.2021.1.4.22.
- [21] Y. Kasai, Y. Jinbo, H. Kamikawa, and T. Sanada, “CFD Modeling of Adsorption Rate Prediction for Granular Activated Carbon Packed Bed,” *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 56, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1080/00219592.2023.2172980.
- [22] M. Rösler and C. Wedler, “Adsorption kinetics and equilibria of two methanol samples with different water content on activated carbon,” *Adsorption*, vol. 27, no. 8, pp. 1175–1190, Nov. 2021, doi: 10.1007/s10450-021-00341-9.
- [23] P. Ghorbani and M. Siavashi, “Experimental performance analysis of methanol adsorption in granular activated carbon packed bed through design of a double pipe heat exchanger with longitudinal fins,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 158, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107938.
- [24] P. Ghorbani and M. Siavashi, “Experimental investigation of the effect of particle size of granular activated carbon in a packed bed on methanol adsorption/desorption,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 284, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128997.
- [25] M. Mikhaeil, M. Gaderer, and B. Dawoud, “Experimental Investigation of the Adsorption and Desorption Kinetics on an Open-Structured Asymmetric Plate Heat Exchanger; Matching Between Small-Scale and Full-Scale Results,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, Mar. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.818486.
- [26] J. K. Choi, A. Paudel, B. Karki, K. Bradley, N. Quinn, and A. Ciric, “Comprehensive reviews on technological and life cycle environmental aspects of solar–thermal adsorption refrigerator,” Mar. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.resenv.2025.100195.

- [27] T. H. Lo and I. S. Park, "Triple-scale analysis of submolecular, molecular, and meso scales for CO₂ adsorption on activated carbon adsorbents," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 172, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110338.
- [28] A. Qudoos *et al.*, "Review on computational fluid dynamics (CFD) modeling and simulation of CO₂ adsorption," Dec. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2025.107336.
- [29] T. Bujok *et al.*, "Novel Glue-Stabilized Sorbent Layers for Adsorption Chillers: Thermal and Sorption Characteristics," *Energies (Basel)*, vol. 19, no. 2, p. 400, Jan. 2026, doi: 10.3390/en19020400.
- [30] G. Gediz Ilis, H. Demir, and B. B. Saha, "Innovative approach in adsorption chiller: Combination of condenser-adsorber for improving performance," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 192, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116958.
- [31] K. Grabowska, K. Sztekler, J. Krzywanski, M. Sosnowski, S. Stefanski, and W. Nowak, "Construction of an innovative adsorbent bed configuration in the adsorption chiller part 2. experimental research of coated bed samples," *Energy*, vol. 215, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119123.
- [32] D. Palamara, E. Proverbio, A. Frazzica, and L. Calabrese, "Tailored SAPO-34/Graphite Adsorbent Composite Coatings on Aluminum Substrate for Energy Sustainable Sorption Technologies," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/polym17030260.
- [33] M. Helmy, H. H. El-Ghetany, M. H. Ahmed, H. Mosalam, and W. I. A. Aly, "Experimental study of the optimal mixing ratio of metallic additives for improving the performance of the solar activated carbon-methanol adsorption refrigeration system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 167, pp. 118–126, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2024.07.006.
- [34] A. Asif Sha, V. Baiju, R. S. Rehna, T. Suzuki, H. Singh, and M. Ichianagi, "Performance investigations of carbon based consolidated composite adsorbents effective for adsorption cooling systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 217, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119199.
- [35] P. Pasqualin, M. H. Hu, F. Boccamazzo, G. Auti, W. L. Hsu, and H. Daiguji, "A dynamic model of a pressure-driven adsorption chiller with circulating adsorbent particles: Comparison to chillers with fixed adsorbent," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 279, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127500.
- [36] S. Cai, Z. Hua, M. Dai, S. Li, X. Luo, and Z. Tu, "Performance analysis of adsorption refrigeration using a composite adsorbent with improved heat and mass transfer," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 216, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124523.

- [37] Ł. Mika *et al.*, “Development of New Composite Beds for Enhancing the Heat Transfer in Adsorption Cooling Systems,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18030584.
- [38] A. J. Camargo *et al.*, “Potencial Termodinámico de un Refrigerador Intermitente por Adsorción bajo las Condiciones Climáticas de Riohacha, en Colombia,” *Información tecnológica*, vol. 30, no. 5, pp. 139–146, Oct. 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000500139.