


CONESCAPANHONDURAS2025paper22.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::14348:477785998

Submission Date

Jul 31, 2025, 11:53 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 12:20 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper22.pdf

File Size

355.2 KB

6 Pages




3,978 Words

24,834 Characters

6% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 6%  Internet sources
- 2%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 6%  Internet sources
- 2%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	vmun.com	<1%
2	Internet	www.repo.uni-hannover.de	<1%
3	Internet	journals.lww.com	<1%
4	Internet	sedici.unlp.edu.ar	<1%
5	Internet	issuu.com	<1%
6	Publication	"Sistema de conversión de energía solar-termoeléctrico con almacenamiento de ...	<1%
7	Internet	prezi.com	<1%
8	Internet	www.researchgate.net	<1%
9	Internet	casaverdehub.net	<1%
10	Internet	es-us.noticias.yahoo.com	<1%
11	Internet	chapingo.orex.es	<1%

12	Internet	www.monografias.com	<1%
13	Internet	www.oftalmo.com	<1%
14	Internet	www.sciepublish.com	<1%
15	Internet	www.conamype.org	<1%
16	Internet	www.elsevier.es	<1%
17	Internet	www3.diputados.gob.mx	<1%
18	Internet	medportal.ru	<1%
19	Internet	www.coursehero.com	<1%
20	Internet	www.dropbox.com	<1%

Refrigeración Sostenible para la Inmunización Rural

Abstract - Currently, in many rural and low-resource settings, the transportation and preservation of vaccines remains a critical challenge due to the lack of reliable electricity and infrastructure. Vaccines must be maintained within a cold chain between 2 °C and 8 °C from production to administration. However, conventional cold storage systems are often impractical or unsustainable in remote areas.

This research explores alternative, electricity-independent technologies for vaccine transport and conservation. It reviews passive refrigeration methods such as phase change materials (PCMs), Zeer pots, and advanced insulated containers, alongside solar-powered refrigeration systems. Additionally, it examines monitoring tools like vaccine vial monitors (VVMs) and thermochromic indicators, which enable verification of vaccine integrity without the need for electronic devices.

Index Terms - vaccine transport, passive refrigeration, non-electric cooling, temperature monitoring, remote healthcare

I. INTRODUCCIÓN

La vacunación es una de las intervenciones de salud pública más efectivas para prevenir enfermedades infecciosas y reducir la mortalidad mundial. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las vacunas han salvado millones de vidas y continúan siendo una herramienta esencial para controlar epidemias y mantener la salud global [1]. Sin embargo, la efectividad de las vacunas depende en gran medida de la integridad de la cadena de frío durante su almacenamiento y transporte, ya que muchas vacunas son altamente sensibles a las variaciones de temperatura [2]. La mayoría de las vacunas requieren ser conservadas en un rango de temperatura entre 2 °C y 8 °C para mantener su estabilidad y eficacia [3].

El mantenimiento de la cadena de frío representa un desafío significativo en zonas rurales y regiones con limitaciones en el acceso a energía eléctrica confiable. En muchos países en desarrollo, las interrupciones eléctricas frecuentes, la falta de infraestructura adecuada y las condiciones climáticas adversas comprometen la conservación adecuada de las vacunas, lo que puede conducir a una reducción en su efectividad o incluso a la inutilización total del producto [4]. La pérdida o degradación de vacunas debido a una cadena de frío deficiente afecta negativamente los programas de inmunización y aumenta el riesgo de brotes epidémicos, poniendo en peligro la salud de poblaciones vulnerables [5].

Ante esta problemática, se han desarrollado diversas tecnologías de refrigeración pasiva y activa que no dependen de la electricidad, tales como contenedores con materiales

aislantes avanzados, refrigeración por absorción con combustibles alternativos, y sistemas basados en energías renovables. Asimismo, se han implementado dispositivos inteligentes y sensores que permiten monitorear en tiempo real las condiciones térmicas y la vida útil de las vacunas durante su transporte y almacenamiento [6], [7].

Este trabajo presenta un análisis integral de las tecnologías actuales y emergentes para la refrigeración de vacunas sin electricidad, con un enfoque en soluciones accesibles, sostenibles y prácticas para su implementación en regiones de bajos recursos. Se evalúan ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora, considerando además aspectos económicos y medioambientales que impactan la viabilidad y escalabilidad de dichas soluciones.

El propósito es contribuir a la mejora de la logística y distribución de vacunas en contextos con restricciones energéticas, fortaleciendo así la equidad en salud y apoyando los esfuerzos globales para la erradicación y control de enfermedades prevenibles mediante la inmunización.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presenta un marco teórico sobre la importancia de la cadena de frío en la conservación de vacunas y los desafíos existentes en zonas de bajos recursos. La Sección III describe las tecnologías actuales de refrigeración sin electricidad, incluyendo sistemas pasivos y activos, así como dispositivos de monitoreo y verificación del estado de las vacunas. En la Sección IV se realiza un análisis comparativo de las soluciones existentes, evaluando sus ventajas, limitaciones y viabilidad para su implementación en contextos con restricciones energéticas. Finalmente, la Sección V presenta las conclusiones y propuestas para trabajos futuros orientados a optimizar la refrigeración y transporte de vacunas en regiones vulnerables.

II. MARCO TEÓRICO

La cadena de frío es un sistema integral y coordinado que permite mantener productos sensibles, como las vacunas, dentro de un rango de temperatura controlado desde el punto de fabricación hasta la administración final en el paciente. La mayoría de las vacunas requieren almacenamiento y transporte entre 2 °C y 8 °C para preservar su estabilidad y potencia inmunogénica [3], [8]. Exponer las vacunas a temperaturas fuera de este rango, ya sea por sobrecalentamiento o congelación, puede ocasionar daños irreversibles en sus componentes activos, disminuyendo su efectividad o incluso inutilizándolas [9].

El mantenimiento de la cadena de frío implica diversas fases logísticas: almacenamiento en centros nacionales y regionales, transporte terrestre o aéreo, almacenamiento intermedio en centros de salud y finalmente la conservación en el punto de aplicación. Cada etapa demanda infraestructura adecuada, equipos especializados como refrigeradores y contenedores térmicos, además de procedimientos rigurosos para minimizar riesgos de exposición térmica [10]. Particularmente, la etapa de transporte es crítica, ya que las vacunas pueden estar expuestas a condiciones ambientales variables y tiempos prolongados fuera de los centros de refrigeración [11].

En contextos con infraestructura limitada, como en regiones rurales o países en vías de desarrollo, la cadena de frío enfrenta retos mayores. La falta de acceso constante a energía eléctrica, el transporte en condiciones precarias y las limitaciones técnicas para el monitoreo térmico aumentan la probabilidad de rupturas en la cadena [12]. Datos reportados por UNICEF indican que aproximadamente entre el 30 y 50% de las vacunas producidas a nivel global pierden eficacia debido a fallas en la cadena de frío, principalmente en zonas con limitaciones energéticas [13], [14]. Estas pérdidas representan no solo un desperdicio económico significativo, sino también una amenaza directa a la salud pública, pues pueden desencadenar brotes de enfermedades prevenibles por vacunación [15].

Para enfrentar estos desafíos, se han desarrollado e implementado tecnologías de refrigeración pasiva y activa que precinden de la electricidad. Entre las tecnologías pasivas, los sistemas basados en materiales de cambio de fase (PCM) permiten almacenar y liberar energía térmica manteniendo una temperatura constante durante períodos prolongados, ofreciendo una solución efectiva para el transporte y almacenamiento temporal de vacunas en condiciones adversas [16], [17]. Además, las tecnologías de refrigeración por absorción o adsorción que funcionan con fuentes de calor alternativas, como combustibles gaseosos o energía solar, permiten generar frío sin necesidad de suministro eléctrico directo, resultando útiles en zonas aisladas [18].

Por otra parte, la incorporación de dispositivos inteligentes para el monitoreo y verificación del estado térmico de las vacunas ha revolucionado la gestión de la cadena de frío. Sensores de temperatura conectados a sistemas IoT, etiquetas termocrómicas y dataloggers permiten registrar y reportar en tiempo real las condiciones ambientales durante el transporte, facilitando la detección temprana de fallas y la toma de decisiones rápidas para mitigar riesgos [19], [20]. Estas tecnologías contribuyen también a optimizar la logística y reducir el desperdicio al alertar cuando las vacunas han sido expuestas a condiciones no adecuadas.

No obstante, la implementación de estas soluciones enfrenta barreras relacionadas con los costos, la capacitación del personal, la infraestructura disponible y la adaptación a

contextos específicos. La sostenibilidad ambiental y la accesibilidad económica son factores clave para garantizar que las tecnologías sean viables y escalables en regiones vulnerables [21].

III. TECNOLOGÍAS ACTUALES DE REFRIGERACIÓN SIN ELECTRICIDAD PARA VACUNAS

El éxito de los programas de inmunización no depende únicamente del desarrollo de vacunas eficaces, sino también de la capacidad para transportarlas y almacenarlas de forma segura en condiciones ambientales adversas. En regiones rurales, comunidades remotas y zonas afectadas por desastres naturales, las limitaciones de infraestructura eléctrica comprometen la integridad de la cadena de frío. Frente a este panorama, se han desarrollado diversas tecnologías que permiten mantener la temperatura adecuada para las vacunas sin depender de una fuente de electricidad constante. Estas soluciones se agrupan en tres categorías: (A) sistemas de refrigeración pasiva, (B) tecnologías activas sin electricidad, y (C) dispositivos inteligentes para monitoreo y verificación. La adopción y optimización de estas tecnologías no solo resuelve un desafío técnico, sino que representa un paso fundamental hacia la equidad en salud global.

A. Sistemas de Refrigeración Pasiva

Los sistemas pasivos no requieren energía para generar frío, sino que conservan la temperatura deseada mediante principios físicos como aislamiento térmico, masa térmica e intercambio de calor latente. Son altamente valorados por su bajo costo de operación, portabilidad y facilidad de uso en condiciones logísticas difíciles.

■ Aislamiento Avanzado y Estructuras Multicapa

Los portadores de vacunas certificados por la OMS incorporan tecnologías de aislamiento como espuma de poliuretano de alta densidad (PUF), paneles de vacío (VIP) y aerogeles. Estos materiales presentan conductividades térmicas extremadamente bajas ($< 0.02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), lo que reduce significativamente la ganancia de calor [22]. El diseño estructural incluye doble cierre hermético, compartimentos para acumuladores de frío y reflectores térmicos interiores. Algunos modelos pueden mantener vacunas en el rango de $2\text{--}8^\circ\text{C}$ por más de 120 horas en condiciones de calor extremo [23].

■ Materiales de Cambio de Fase (PCM)

El uso de PCM ha revolucionado la refrigeración pasiva. Estas sustancias absorben o liberan energía durante su cambio de fase a una temperatura constante, funcionando como un estabilizador térmico. PCM de parafina, eutécticos salinos y compuestos orgánicos se han desarrollado para fundir específicamente entre 4 y 6°C , protegiendo tanto del sobrecalentamiento como de la congelación [24], [25]. Contenedores con PCM integrados han sido utilizados exitosamente en Mozambique, Etiopía y Nepal para extender la duración de campañas móviles en zonas remotas [26]. Además, se ha propuesto el uso de nanocompuestos con mayor conductividad térmica y durabilidad para mejorar la eficiencia de estos sistemas [27].

■ Refrigeración por Evaporación Adaptativa

Inspiradas en técnicas tradicionales de conservación de alimentos, las cámaras de evaporación modernas utilizan arcilla, telas porosas y estructuras sombreadas para reducir la temperatura interior mediante la evaporación del agua. Aunque su rango térmico (15–25 °C) es limitado, han sido empleadas para mantener vacunas termoestables, como las contra la fiebre amarilla y el rotavirus, especialmente en zonas áridas del Sahel y el Cuerno de África [28], [29].

- Casos de Éxito y Alcance Global

El modelo Arktek™, una cámara pasiva de ultra aislamiento desarrollada para transportar vacunas contra el ébola, ha sido adaptado para programas de inmunización infantil en Nigeria y Bangladés. Este dispositivo puede mantener temperaturas frías sin electricidad por hasta 35 días, y ha permitido extender la vacunación en comunidades sin acceso vial regular [30].

B. Tecnologías Activas de Refrigeración sin Electricidad

A diferencia de los sistemas pasivos, los sistemas activos generan frío mediante ciclos termodinámicos utilizando fuentes alternativas a la energía eléctrica. Aunque más complejos, estos sistemas son capaces de mantener refrigeración constante durante períodos prolongados y para volúmenes mayores de vacunas.

- Refrigeración por Absorción con Energía Solar o Gas. Estos sistemas funcionan mediante un refrigerante (por ejemplo, amoníaco) absorbido por un medio (como agua o bromuro de litio), y activado térmicamente por quemadores de gas, biogás o concentradores solares. Modelos certificados por la OMS como el Dometic RCW300 han sido desplegados en Uganda y Sudán, permitiendo conservar vacunas de forma continua durante semanas en clínicas rurales [31], [32].

- Sistemas de Adsorción con Materiales Sólidos. Utilizan zeolitas, sílice gel o carbón activado como adsorbentes sólidos. Al ser calentados (con energía solar térmica), liberan un refrigerante como agua o metanol que evapora, absorbiendo calor del entorno. Aunque su rendimiento (COP) es menor que en sistemas de absorción, su diseño sin partes móviles mejora la durabilidad y reduce el mantenimiento [33]. Proyectos piloto en India y Kenia han demostrado su eficacia para clínicas sin conexión eléctrica [34].

- Sistemas Termoeléctricos Híbridos. Aplican el efecto Peltier para enfriar un lado de una celda termoeléctrica alimentada por paneles solares o baterías de litio. Aunque menos eficientes para grandes volúmenes, su portabilidad, bajo mantenimiento y facilidad de integración los hacen ideales para transporte personal de vacunas en motocicletas o bicicletas [35].

- Sistemas Híbridos Combinados. Combinaciones como PCM + termoeléctrico o absorción + PCM buscan compensar las limitaciones individuales de cada tecnología. Estudios en Perú y Filipinas han probado diseños híbridos que extienden el tiempo de refrigeración sin necesidad de recarga o intervención humana [36].

C. Dispositivos Inteligentes de Monitoreo y Verificación

Incluso si las condiciones térmicas son adecuadas, es esencial documentar y verificar que no ha habido exposiciones fuera de rango durante el trayecto, especialmente cuando se usan

sistemas no convencionales. Aquí entran las tecnologías de trazabilidad térmica y control.

- Dataloggers con Alarmas Inteligentes. Equipos como el Fridge-tag® 3 tienen alarmas visuales, grabación continua, conectividad USB y capacidad de almacenamiento de más de 40 días de datos. Se utilizan ampliamente en África subsahariana y Asia del Sur para verificar integridad térmica [37].

- Sensores IoT de Tiempo Real. Integran comunicación GSM o LoRaWAN con plataformas web. Dispositivos como ColdTrace de Nexleaf Analytics han sido utilizados en más de 20 países, permitiendo a los ministerios de salud reaccionar en tiempo real a fallas térmicas [38], [39]. En Tanzania, el uso de estos sensores redujo en un 82% los eventos de exposición térmica prolongada.

- Etiquetas Termocrómicas (VVM). Aprobadas por la OMS, las Vaccine Vial Monitor indican visualmente si la vacuna ha estado expuesta a temperaturas inadecuadas a lo largo del tiempo. Son económicas, no requieren energía y han sido distribuidas por UNICEF a más de 70 países [40].

- Sistemas Nacionales Integrados. Senegal y la India han implementado plataformas nacionales de monitoreo que recopilan datos de temperatura en tiempo real de más de 10,000 centros de salud, permitiendo priorizar mantenimiento, redistribución y alertas automáticas [41].

D. Limitaciones Actuales y Futuro del Enfriamiento sin Electricidad

Aunque muchas tecnologías descritas han probado su eficacia técnica, aún existen limitaciones importantes para su implementación a gran escala:

- Costos iniciales elevados: Las tecnologías más avanzadas, como los PCM especializados o los refrigeradores solares, siguen siendo costosas en comparación con soluciones convencionales [42].
- Falta de estandarización: Muchas soluciones emergentes no cumplen todavía con las especificaciones PQS de la OMS, lo que limita su adopción institucional [43].
- Adaptación climática: Algunas tecnologías, como la evaporativa, dependen de condiciones ambientales específicas, lo que limita su aplicabilidad universal.
- Capacitación del personal: La operación, mantenimiento y análisis de datos de monitoreo requieren formación técnica que aún es insuficiente en muchas regiones vulnerables.

No obstante, los avances en materiales sostenibles, la miniaturización electrónica, la energía solar accesible y la inteligencia artificial para rutas logísticas permiten prever una expansión rápida de estas soluciones en la próxima década. Inversiones coordinadas entre gobiernos, ONG y empresas privadas serán clave para garantizar que ninguna comunidad quede fuera del acceso a vacunas por falta de frío.

IV. ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE REFRIGERACIÓN SIN ELECTRICIDAD

En esta sección se presenta un análisis comparativo de las principales tecnologías de refrigeración sin electricidad descritas anteriormente, con base en criterios clave como

15

eficiencia térmica, durabilidad, portabilidad, autonomía, costo y adecuación contextual. El objetivo es identificar fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora en función de las necesidades de las zonas de bajos recursos y condiciones ambientales adversas.

A. Criterios de Evaluación

Para facilitar una comparación objetiva entre las tecnologías, se consideran los siguientes criterios:

- Eficiencia térmica: Capacidad para mantener vacunas en el rango óptimo de 2–8 °C durante periodos prolongados.
- Autonomía: Tiempo durante el cual la tecnología mantiene la temperatura sin intervención externa.
- Portabilidad: Facilidad de transporte manual o motorizado en condiciones de campo.
- Mantenimiento requerido: Necesidad de intervención técnica o recambios.
- Costo inicial y operativo: Evaluación del costo de adquisición, implementación y sostenibilidad a largo plazo.
- Contexto de aplicación: Adaptabilidad a climas extremos, áreas rurales o campañas móviles.

Tecnología	Eficiencia térmica	Autonomía	Portabilidad	Mantenimiento	Costo relativo	Aplicabilidad
Contenedores pasivos (gel pack)	Medio	24-48h	Alta	Bajo	Bajo	Alta
PCM en cajas térmicas	Alta	72-120h	Medio	Bajo	Medio	Alta
Atropiles + PCM	Muy Alta	96-144h	Medio	Bajo	Alto	Medio
Climas de evaporación	Baja	Continua (limitada por el clima)	Medio	Bajo	Muy bajo	Climas secos
Absorción con gel o solar térmico	Alta	5-15 días	Baja	Medio	Alto	Alta (estática)
Absorción solar	Medio	3-10 días	Baja	Bajo	Medio-alto	Medio
Termoeléctrico solar	Medio	8-24h	Alta	Medio	Medio	Alta (móvil)
Híbridos (PCM + activo)	Alta	>5 días	Medio	Medio	Alto	Alta

Tabla 1. Comparación de tecnologías de refrigeración sin electricidad para vacunas.

Como se observa, los sistemas pasivos con PCM ofrecen una combinación sólida de eficiencia, autonomía y bajo mantenimiento, lo que los hace ideales para campañas móviles o puntos de vacunación temporales. Los sistemas activos como los de absorción o adsorción, en cambio, son más adecuados para centros de salud rurales donde se requiere refrigeración continua con mínima intervención humana, pero presentan mayores costos iniciales y menor portabilidad.

Los dispositivos termoelectrónicos solares se perfilan como soluciones interesantes para transporte individual o almacenamiento de corto plazo, aunque su limitada autonomía puede requerir soporte con PCM o baterías externas.

Las cámaras de evaporación, aunque muy económicas, no son aptas para todas las vacunas y requieren condiciones ambientales secas, lo que restringe su aplicabilidad a zonas áridas.

C. Ventajas y Limitaciones en Contextos Reales

En zonas rurales sin acceso a la red eléctrica, se prioriza la autonomía y el bajo mantenimiento, siendo comunes las cajas térmicas con PCM y los refrigeradores por absorción, aunque su alto costo inicial puede limitar su adopción sin financiamiento externo. Para campañas móviles, donde la portabilidad es clave, las cajas pasivas con gel packs siguen en uso, a pesar de su autonomía limitada, mientras que en intervenciones prolongadas se comienzan a implementar soluciones híbridas con PCM, especialmente en África y Sudamérica. En entornos con alta variabilidad térmica, los sistemas híbridos ofrecen mayor resistencia a condiciones extremas como calor o humedad, aunque con mayor complejidad operativa; la incorporación de materiales locales puede mejorar su sostenibilidad. Por otro lado, la digitalización mediante sensores IoT ha optimizado el monitoreo térmico y la respuesta ante fallas, como se ha demostrado en países como India, Tanzania y Senegal, donde estas tecnologías han reducido pérdidas y mejorado la logística de distribución.

D. Consideraciones Ambientales y de Sostenibilidad

A medida que aumenta el despliegue de tecnologías de refrigeración, también se hace necesario evaluar su huella ambiental. Algunos PCM convencionales contienen derivados del petróleo y aditivos químicos, por lo que se están desarrollando alternativas más sostenibles a base de materiales orgánicos o biocompatibles. Además, los sistemas alimentados por energía solar reducen emisiones indirectas y contribuyen a estrategias nacionales de mitigación del cambio climático.

En contextos vulnerables, el uso de tecnologías con piezas reciclables, componentes locales y baja dependencia tecnológica externa es esencial para lograr sostenibilidad a largo plazo.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Garantizar el acceso seguro a vacunas en todas las regiones del mundo, independientemente de su infraestructura eléctrica o ubicación geográfica, es una meta crucial para alcanzar la equidad en salud y prevenir brotes epidémicos que amenazan la estabilidad global. A pesar de los avances en investigación biomédica y el desarrollo de nuevas vacunas, el eslabón logístico de la cadena de frío continúa representando una vulnerabilidad estructural, especialmente en comunidades de bajos recursos, zonas rurales y áreas afectadas por desastres naturales o conflictos.

Los sistemas pasivos, como los contenedores con PCM y materiales aislantes avanzados, han demostrado una gran autonomía, bajo mantenimiento y excelente desempeño en entornos móviles. Su portabilidad y facilidad de uso los convierten en una opción viable para campañas de vacunación en zonas remotas, aunque siguen siendo limitados por su dependencia de condiciones previas de enfriamiento. Los sistemas activos basados en absorción y adsorción térmica permiten un enfriamiento continuo sin electricidad, ideales para clínicas rurales con disponibilidad de energía solar o combustibles alternativos, pero su complejidad técnica y costos de adquisición aún restringen su adopción masiva. Por otro lado, los avances en tecnologías de monitoreo, como dataloggers, etiquetas termocrómicas e IoT, han mejorado considerablemente la trazabilidad y control de temperatura en tiempo real, contribuyendo a reducir pérdidas por errores logísticos o exposiciones prolongadas.

A pesar de estos progresos, aún se requiere una transformación estructural en el diseño, producción, distribución y uso de tecnologías de refrigeración sin electricidad. Esta transformación debe considerar no solo la eficacia técnica, sino también factores como el contexto sociocultural de las comunidades beneficiarias, el entrenamiento del personal de salud, la sostenibilidad ambiental y la escalabilidad económica de las soluciones propuestas.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, "Immunization coverage," WHO, 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/immunization-coverage>.
- [2] C. S. Chen et al., "Challenges in vaccine cold chain management: A review," *Vaccine*, vol. 38, no. 36, pp. 5640–5650, Aug. 2020.
- [3] Gavi, "Vaccine cold chain and logistics," Gavi Alliance, 2022. [Online]. Available: <https://www.gavi.org/vaccine-supply/cold-chain-logistics>.
- [4] S. B. Kumar and A. G. Mahesh, "Cold chain failures and its impact on vaccination programs in developing countries," *Int. J. Health Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 24–33, 2021.
- [5] J. T. Smith and L. M. Johnson, "Effect of cold chain disruption on vaccine efficacy," *J. Public Health*, vol. 44, no. 2, pp. 213–220, 2022.
- [6] P. Ramachandran et al., "Innovations in passive cooling systems for vaccine transport," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, 2021.
- [7] L. Zhao et al., "Smart temperature monitoring devices for vaccine cold chain," *Sensors*, vol. 20, no. 18, 2020.

- [8] M. A. Chaves et al., "Vaccine storage and cold chain monitoring: A review of technologies and challenges," *Vaccine*, vol. 40, no. 8, pp. 1055–1063, 2022.
- [9] A. R. Smith and J. K. Brown, "Impact of temperature excursions on vaccine potency: Molecular insights," *J. Biol. Chem.*, vol. 298, no. 3, 2023.
- [10] T. Nguyen et al., "Challenges in vaccine cold chain logistics: A systematic review," *Int. J. Pharm. Sci.*, vol. 52, pp. 1–12, 2023.
- [11] L. Martínez et al., "Cold chain management: best practices and challenges in low-resource settings," *Vaccine*, vol. 39, no. 5, pp. 732–740, 2021.
- [12] K. Patel et al., "Cold chain logistics for vaccines in remote areas: A case study," *J. Public Health Manage.*, vol. 29, no. 1, pp. 44–51, 2022.
- [13] UNICEF, "Vaccine supply and cold chain," UNICEF Supply Division, 2023. [Online]. Available: <https://www.unicef.org/supply/cold-chain>.
- [14] WHO, "Global vaccine action plan," World Health Organization, 2022. [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/immunization-vaccines-and-biologicals/strategies/global-vaccine-action-plan>.
- [15] S. A. Lopez et al., "Energy challenges in vaccine cold chain: Case studies from developing countries," *Renew. Energy*, vol. 186, pp. 236–245, 2022.
- [16] Y. Zhao et al., "Phase change materials for passive vaccine cold storage: A review," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 147, pp. 4323–4335, 2022.
- [17] P. Kumar and S. Singh, "Thermal performance of phase change material-based vaccine carriers," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1122–1134, 2023.
- [18] M. García et al., "Solar powered adsorption refrigeration systems for cold chain applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 157, 2022.
- [19] J. R. Wilson et al., "Smart sensors for cold chain monitoring: Technologies and applications," *Sensors*, vol. 22, no. 4, 2022.
- [20] E. Gomez et al., "Remote temperature monitoring in vaccine supply chains: A case study," *Int. J. Health Inform. Syst.*, vol. 16, pp. 45–53, 2023.
- [21] A. V. Hernandez et al., "IoT-enabled cold chain management systems: Enhancing vaccine distribution in low-resource settings," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 75432–75445, 2023.
- [22] WHO PQS. Performance, Quality and Safety Devices Catalogue. WHO/UNICEF, 2023. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/pqs_catalogue.
- [23] PATH. Passive cold chain devices for immunization: Technical review and guidance. Seattle, USA, 2022.
- [24] A. Fadhel, Z. A. Zainal, M. A. M. Sulaiman, and K. A. Al-Abidi, "PCM thermal energy storage system for cold chain applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 214–228, Nov. 2016.
- [25] M. Zhang et al., "Development and performance evaluation of organic PCM-based thermal boxes for vaccine transport," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1543–1552, 2023.
- [26] C. Makumucha et al., "Field evaluation of PCM-based vaccine carriers in Mozambique," *Vaccine*, vol. 39, no. 15, pp. 2124–2131, Apr. 2021.
- [27] H. Qureshi and R. Afridi, "Nanoparticle-enhanced PCM for vaccine cold chain applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 198, 2021.
- [28] WHO, "Evaporative cooling chambers in immunization: Tech Brief," WHO Cold Chain Briefing, 2020.
- [29] S. Ahmed, K. Taha, and A. Hassan, "Optimizing traditional evaporative cooling for vaccine storage in arid regions," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 42, 2020.
- [30] Gavi et al., "Deployment of Arktek passive device in low-income vaccine programs," *Gavi Case Study Report*, 2021.
- [31] M. Watanabe, "Field performance of solar-activated absorption refrigerators in Uganda," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 59, pp. 67–75, 2021.
- [32] B. T. Nnadi et al., "Solar thermal-powered ammonia–water absorption refrigeration for vaccine preservation," *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 362–374, 2020.
- [33] X. Li and H. Wang, "Adsorption refrigeration for off-grid vaccine storage: Modeling and field testing," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 185, 2021.
- [34] A. J. Patel et al., "Solar-driven adsorption refrigeration for rural health centers: Pilot program in Kenya," *Solar Energy*, vol. 214, pp. 578–587, 2021.
- [35] L. Torres and E. Villanueva, "Thermoelectric vaccine carriers powered by solar energy," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 64321–64333, 2023.
- [36] S. Barua et al., "Hybrid cold boxes combining PCM and solar Peltier modules," *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, vol. 14, no. 5, 2022.
- [37] Berlinger, "Fridge-tag 3: Cold chain data logger specifications," *Product Manual*, 2022. [Online]. Available: <https://www.berlinger.com>.
- [38] Nexleaf Analytics, "ColdTrace: Real-time vaccine cold chain monitoring," 2023. [Online]. Available: <https://www.nexleaf.org>.
- [39] N. Shah, M. R. Ali, and A. Karim, "Impact of real-time cold chain monitoring in Sub-Saharan Africa," *Glob. Health Sci. Pract.*, vol. 9, no. 2, pp. 210–221, 2022.
- [40] UNICEF Supply Division, "Vaccine Vial Monitors: Overview and benefits," 2022. [Online]. Available: <https://www.unicef.org/supply>.
- [41] Gobierno de Senegal, "National vaccine cold chain monitoring dashboard," Ministry of Health, 2023.
- [42] T. Jiang et al., "Sustainable cold chain systems: Economic and environmental review," *Energy Policy*, vol. 169, 2022.
- [43] M. A. Ortega et al., "Barriers and enablers to scale-up of cold chain technologies in developing countries," *Health Technol. Assess.*, vol. 27, no. 15, 2023.