DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 43-52

Modelo de optimización basado en algoritmos genéticos para la gestión del mantenimiento de refrigeradores en una red fría hospitalaria

A genetic algorithm-based optimization model for managing refrigerator maintenance in a hospital cold chain.

I. M. Aranda-Gregorio [a], L. Pérez-Martínez [a,*], J. C. Seck-Tuoh-Mora [a],
N. Hernández-Romero [a], G. E. Anaya-Fuentes [a]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

La red fría hospitalaria es un elemento esencial en las unidades médicas, ya que garantiza la conservación adecuada de insumos críticos, como medicamentos y vacunas. En ese contexto, el mantenimiento de los equipos de refrigeración resulta fundamental para preservar la calidad, la seguridad y la eficacia de dichos insumos. El presente artículo propone una metodología experimental orientada a optimizar el mantenimiento de los equipos de refrigeración mediante el uso de algoritmos genéticos bajo un enfoque de minimización. A partir de su implementación, se logran la reducción de tiempos muertos, el adecuado registro de bitácoras de mantenimiento y la disminución de mantenimientos correctivos en refrigeradores de alta prioridad de una institución hospitalaria del Estado de Hidalgo.

Palabras Clave: Red fría hospitalaria, equipos de refrigeración, algoritmos genéricos.

Abstract

The hospital cold chain network constitutes an essential component within healthcare facilities, as it ensures the proper preservation of critical medical supplies such as medications and vaccines. In this context, the maintenance of refrigeration equipment is fundamental to preserving the quality, safety, and effectiveness of these supplies. This study proposes an experimental methodology to optimize the maintenance of refrigeration systems using genetic algorithms. Its implementation involves accurate maintenance logs and a decrease in maintenance interventions in high-priority refrigeration units at a hospital in the state of Hidalgo.

Keywords: Hospital cold chain network, refrigeration equipment, genetic algorithms.

1. Introducción

El mantenimiento ocupa un lugar central dentro de cualquier organización, en el sector hospitalario es de particular importancia y de su correcta implementación depende la seguridad e incluso la vida de los pacientes. El sector médico en general, y el hospitalario en particular, está sujeto a exigencias especialmente estrictas en materia de mantenimiento. El error, tolerable en otras industrias, no tiene cabida en las instituciones de salud (Dimo Maint, 2026).

El presente artículo tiene como objetivo analizar y proponer una solución a una problemática susceptible de presentarse en diversos hospitales del estado de Hidalgo y del país, relacionada con la gestión y el funcionamiento adecuado de la red fría hospitalaria. Este sistema constituye un componente esencial para garantizar la correcta conservación de insumos médicos, asegurando que estos mantengan las condiciones de temperatura requeridas para preservar su calidad, seguridad y eficacia.

En México, un estudio de monitoreo de la cadena de frío para vacunas mostró que, aunque la mayor parte del tiempo las temperaturas se mantuvieron dentro del intervalo

*Autor para la correspondencia: pe435006@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: ar332524@uaeh.edu.mx (Itzel Magaly Aranda-Gregorio), pe435006@uaeh.edu.mx (Lizbeth Pérez-Martínez), jseck@uaeh.edu.mx (Juan Carlos Seck-Tuoh-Mora), nhromero@uaeh.edu.mx (Norberto Hernández-Romero), ganaya@uaeh.edu.mx (Gustavo Erick Anaya-Fuentes).

Historial del manuscrito: recibido el 04/06/2026, última versión-revisada recibida el 09/09/2026, aceptado el 09/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18072

CC BY NC ND

recomendado de 2 a 8 °C, las mayores variaciones ocurrieron en los puntos de servicio. Además, el 91% del personal reportó no contar con herramientas suficientes para detectar si una vacuna había sido dañada por una excursión de temperatura, mientras que el 100% consideró que la incorporación de los dispositivos de monitoreo mejoraría el funcionamiento de la cadena de frío. Estos resultados evidencian la necesidad de fortalecer los sistemas de vigilancia y control de temperatura en las instituciones de salud (Carrión Falcón et al., 2020)

Aunque el estudio se centra específicamente en la conservación de vacunas, sus resultados permiten ampliar la perspectiva sobre la importancia de la red fría hospitalaria. En este sentido, la adecuada gestión representa un elemento fundamental para garantizar la calidad de los insumos médicos.

El presente artículo se centrará en el análisis de un hospital que está ubicado en el estado de Hidalgo. Por motivos de confidencialidad y resguardo de la información institucional, no se revelará el nombre de dicha unidad médica; sin embargo, los datos que se emplean son representativos y aproximados, que permiten dar un panorama más preciso de nuestra problemática asociada al mantenimiento preventivo y correctivo de la red fría hospitalaria. Estas aproximaciones buscan garantizar la validez del análisis sin evidenciar la identidad de la institución evaluada.

1.1. Antecedentes

En la institución hospitalaria de estudio existe el área de mantenimiento, la cual está encargada de la mejora de la toma de decisiones para el mantenimiento de las instalaciones, equipo médico, mobiliario, así como el control y distribución de ambientes físicos, fluidos y energéticos, asegurándose de que se encuentren en óptimas condiciones de manera continua, confiable y segura en términos de las normativas y manuales de procedimientos. En dicha área existe la subespecialidad de refrigeración y aire acondicionado, en la que se centrará este estudio.

La red fría hospitalaria forma parte de un componente importante en la operación de los centros de salud, ya que asegura la conservación adecuada de insumos sensibles a la temperatura; como vacunas, medicamentos biológicos y reactivos de laboratorio, garantizando la seguridad de los pacientes y la continuidad de los servicios médicos (Instituto Mexicano del Seguro Social, 2026).

Sin embargo, esta red presenta deficiencias importantes: falta de mantenimiento oportuno en los refrigeradores de alta prioridad, tiempos muertos excesivos para los técnicos responsables y un registro inadecuado en las bitácoras de mantenimiento. Estas problemáticas afectan directamente la eficiencia operativa y aumentan el riesgo de pérdida de insumos críticos.

En este contexto, el presente artículo propone, basado en la observación durante una estancia de prácticas profesionales, generar un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos mediante programación para gestionar de manera eficiente los mantenimientos preventivos y correctivos, mejorar el registro de bitácoras de mantenimiento y reducir los tiempos muertos, impactando positivamente en la supervisión y operación de manera eficaz y confiable de la red fría hospitalaria.

1.2. Trabajos relacionados

Como ejemplo de la importancia de la temperatura en un hospital, tenemos la alimentación parenteral, que consiste en la administración de nutrientes equilibrados y esenciales al torrente sanguíneo. El ácido ascórbico desempeña un papel bioquímico esencial en el organismo, por lo que constituye un componente crucial de la nutrición parenteral. El ácido ascórbico es la vitamina menos estable añadida a la nutrición parenteral (PN) y se oxida rápidamente, especialmente a altas temperaturas y en presencia de iones de cobre. La estabilidad de la PN se ve afectada por la temperatura y la duración del almacenamiento. Durante el almacenamiento, se produce la hidrólisis de los lípidos, lo que libera ácidos grasos libres y provoca una disminución del pH. Un pH más bajo acelera la degradación de las vitaminas (Chiczewski, 2025).

Un hospital tiene características particulares respecto a otros edificios e industrias, lo que implica una mayor exigencia de fiabilidad y seguridad en sus instalaciones y en sus equipos médicos. Para abordar la clasificación del equipamiento y de las instalaciones, deben considerarse distintos criterios para obtener una clasificación estructurada de estas. Se adopta el concepto de sistema como el conjunto de instalaciones, recursos humanos, procedimientos y conocimientos perfectamente estructurados, de tal manera que permitan conocer su comienzo y producto final, así como la posibilidad de su evaluación para su posterior mejora y control, y así definir tanto el alcance, los recursos y los responsables como su inicio y finalización (Gómez, 2006).

Para la clasificación de sistemas se aborda la posibilidad de dividir las empresas en cuatro grandes grupos: manufacturero, transporte, suministro y servicio. Esta clasificación ayuda a interpretar la situación de un hospital; de acuerdo con sus indicadores, favorece la comparación de la actuación de hospitales con perfiles similares. También están asociados a un aspecto conocido como complejidad del case mix (acústica hospitalaria), que guarda relación con las diferentes combinaciones que se producen al atender a pacientes con diversas patologías y tratamientos terapéuticos (Hernández-Nariño, 2014).

Una manera efectiva de conocer la situación actual de una organización es la investigación orientada a esclarecer los interrogantes del objetivo planteado. Realizando un diagnóstico de la situación del mantenimiento hospitalario estudiando las cinco aristas que lo componen, la organización, recursos humanos, los activos físicos, el procedimiento, y el soporte gerencial en el hospital, todo esto a través del proceso de recolección de datos (Castillo, 2011).

Ciertamente, en lo que respecta a los resultados de salud en general, el impacto del progreso tecnológico no puede exagerarse, ya que los avances médicos han permitido mejoras en la prestación de la atención. Por este motivo, se ha vuelto cada vez más importante centrarse en la implementación de metodologías que apoyen la gestión de equipos médicos en entornos sanitarios y optimicen la planificación eficiente del ciclo de vida de estos dispositivos (Almeida, 2020).

Las instalaciones para la producción de energía térmica son fundamentales, ya que garantizan el correcto funcionamiento de los servicios de atención al producir aire primario, eliminar la legionela y proporcionar aire acondicionado a quirófanos, áreas de urgencia, etc. Evitar fallas, fugas o averías puede conducir a una disminución significativa de agua y energía,

debido a la reducción del consumo de combustible, reduciendo las horas de funcionamiento, llevando a una prolongación del ciclo de vida del equipo y a un uso más eficiente de los recursos (Carnero, 2017).

En la actualidad, los modelos de gestión del equipo médico se han convertido en una herramienta de suma importancia para administrar la conservación y la operación adecuadas del equipo médico en centros de atención médica. Esto permite mejorar la atención al paciente y aumentar la productividad del personal médico, además de prolongar la vida útil de la inversión realizada por las organizaciones hospitalarias públicas y privadas. Situación que obliga a los profesionales de la salud encargados de la planificación, adquisición y conservación de equipo médico a buscar herramientas informáticas que les permitan cumplir con este propósito. (Cabrera-Llanos, 2019)

Presentando así algoritmos basados en lógica difusa que modelan un Plan de Gestión de Mantenimiento de Equipos Médicos, este se desarrolla en tres etapas: En la primera se genera un inventario funcional, siguiendo los protocolos recomendados por la OMS e información de cada equipo. En la segunda, se acoplan tres protocolos de atención prioritaria, utilizados para seleccionar las funciones de pertenencia del sistema difuso. En la tercera, se genera una familia de escenarios mediante simulación de Monte Carlo y se calcula el grado de prioridad difuso de mantenimiento (Cabrera-Llanos, 2019).

Rafael Mellado propone un procedimiento de programación de flujo de taller para abordar el problema de la planificación de la reparación de equipos médicos en hospitales públicos, cuyo objetivo principal es eliminar el tiempo de inactividad y minimizar el tiempo total de producción identificando varias mejoras en los métodos aplicados como trabajos futuros, tales como la necesidad de considerar las interrupciones laborales y los efectos psicosociales en los trabajadores debido a la planificación más estricta de los tiempos (Mellado-Silva, 2022).

Para que las instituciones de salud ofrezcan una atención médica de calidad, se requiere que sus equipos funcionen de forma eficiente para garantizar, la disponibilidad y sobre todo la seguridad tanto del paciente como para quienes operan los equipos, por lo cual se requiere de mantenimiento efectivo (Coronel Mendoza, 2018).

Mantener la cadena de frío es crucial, ya que la exposición de vacunas que se encuentren fuera del rango de temperatura puede provocar cambios químicos o físicos en el medicamento, como la segregación o desnaturalización de proteínas (cambios químicos indetectables a simple vista) o cambios visibles en la viscosidad o el color. Las variaciones de temperatura durante la cadena de frío pueden resultar en la pérdida de potencia o estabilidad del medicamento afectado y pueden causar daño al paciente debido a una eficacia reducida o nula, productos de degradación dañinos o eventos adversos (Orth, 2022).

La monitorización de la temperatura dentro de la cadena de frío responde a un principio fundamental: lo que no se registra, no se controla. El control térmico continuo permite detectar variaciones, planificar intervenciones y asegurar la estabilidad de los insumos médicos. La supervisión periódica, complementada con alarmas automáticas, evita la exposición prolongada a temperaturas fuera de su rango seguro (Pérez Gracia, 2026).

La importancia de un programa de mantenimiento bien estructurado se extiende más allá de la simple conservación de equipos; abarca la optimización de todos los sistemas que operan dentro del hospital, asegurando la calidad de la atención y continuidad de los servicios (Martín Díaz et al., 2025)

Más formalmente, y siguiendo la definición dada por Goldberg, “los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas” (Goldberg, 1989).

La gestión de mantenimiento se distingue de otras industrias, ya que exige viabilidad y seguridad. Actualmente, los equipos de mantenimiento enfrentan una creciente complejidad operativa, una mayor carga de datos y la pérdida de conocimiento técnico-teórico. En definitiva, el mantenimiento de los equipos médicos incide directamente en la calidad de los servicios hospitalarios y, para lograr su correcta gestión, es necesario adoptar un enfoque sistémico, integrar el soporte tecnológico y el factor humano. Para el diagnóstico de una organización de este tipo se adopta una visión sistémica que integra los factores implicados. A pesar de ser un tema abordado en los últimos años, las conclusiones apuntan a que el eslabón más débil sigue siendo el manejo operativo del área (Al-Ashi 2026).

De acuerdo con las investigaciones, el mantenimiento preventivo tradicional se está quedando corto y es necesaria la digitalización. Existen desarrollos de modelos de gestión en mantenimiento que permiten mejoras en la planificación y conservación de los equipos; sin embargo, no han sido implementados en la mayoría de las organizaciones. Según el informe del estado del mantenimiento 2025 de Fracttal el 58% de las organizaciones todavía gestionan su mantenimiento con papel u hojas de cálculo. Solo el 7% utiliza software de mantenimiento en la nube. Entre ambos extremos, el 15% trabaja con software on-premise y el 13% depende de módulos ERP que cubren parcialmente las necesidades del área (Fracttal, 2025).

Las organizaciones que aún gestionan en papel están en el paso cero. La digitalización se está haciendo presente, la inteligencia artificial es el tema del momento y es imperativo estandarizar los procesos que se tienen actualmente en la organización hospitalaria. Ya no basta con un mantenimiento correctivo; es necesario adoptar herramientas que ayuden a escalar al mantenimiento preventivo y predictivo, además de centralizar los datos en una plataforma compartida y de fácil acceso (Fracttal, 2025).

1.3. Enfoque metodológico

Los hospitales, especialmente del sector público, se ajustan a presupuestos; un algoritmo de priorización puede decidir qué equipo se debe atender primero, mejorando la eficiencia de la red de mantenimiento y reduciendo los errores en diagnósticos y tratamientos, como variaciones de temperatura en la cadena de frío o fallas en la ventilación de los quirófanos. Los algoritmos ayudan con la gestión del ciclo de vida de los equipos activos y, a su vez, un equipo en correcto funcionamiento logra que la red eficiente dure más años, lo que

representa un ahorro para la organización y permite que ese capital se utilice en otras áreas.

El desarrollo e implementación de un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos aplicados a la red fría hospitalaria permitirán mejorar el mantenimiento de los equipos de refrigeración y, a través de ello, se busca minimizar los costos asociados al mantenimiento correctivo, priorizando la implementación de mantenimientos preventivos y predictivos. El modelo contribuirá a prolongar la vida útil de dichos equipos, reduciendo fallas que puedan comprometer la conservación y eficacia de los insumos médicos. La red fría hospitalaria ha sido un ámbito de estudio que presenta ciertas limitaciones en cuanto a la implementación de estrategias de mantenimiento.

Esto proporciona un enfoque hacia la optimización del mantenimiento de equipos médicos aplicando una herramienta que ayuda a la toma de decisiones, de esta manera, se contribuye a la eficiencia operativa de la red fría hospitalaria. Lo cual constituye un elemento distintivo dentro del campo de investigación aplicado al sector hospitalario.

1.4 Comentarios concluyentes sobre los trabajos relacionados recientes

Diversas investigaciones han señalado la importancia de implementar herramientas de gestión tecnológica para mejorar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los equipos médicos dentro de las instituciones hospitalarias. Los sistemas computarizados de gestión del mantenimiento permiten optimizar la planificación, seguimiento y documentación de las actividades realizadas sobre los activos hospitalarios (World Health Organization, 2012). Asimismo, estudios recientes destacan la necesidad de fortalecer los modelos de mantenimiento hospitalario mediante metodologías que permitan evaluar el desempeño de los equipos y priorizar intervenciones por su criticidad (Escobar Mora et al., 2025; Trejo Morales et al., 2018).

Aunque existen diversos trabajos enfocados en la gestión general del mantenimiento de equipos médicos, no se identificaron estudios de manera específica que aborden la problemática relacionada con la conservación, y optimización de la red fría hospitalaria en instituciones de salud del estado de Hidalgo bajo las condiciones planteadas en este artículo. Por lo tanto, se busca contribuir con una propuesta enfocada en mejorar la gestión y confiabilidad de este sistema crítico para la conservación de insumos médicos.

2. Descripción e identificación del problema

Red fría o cadena de frío es el proceso logístico que comprende el personal, materiales, equipo y procedimientos necesarios para llevar a cabo la recepción, almacenamiento, conservación, guarda y custodia, transporte y distribución para asegurar el manejo correcto de los productos biológicos, medicamentos, dispositivos médicos, sustancias psicotrópicas, estupefacientes, agentes de diagnóstico, material de curación, sangre y componentes sanguíneos en condiciones óptimas de temperatura de refrigeración o congelación, desde el laboratorio que los produce hasta el sitio en que son aplicados a la población; y que por sus características especiales deben mantenerse dentro del intervalo de +2°C a +8°C de temperatura controlada para que no pierdan su efecto terapéutico y poder inmunológico; para sangre y componentes sanguíneos de +2°C a +6°C (Instituto Mexicano del Seguro Social, 2026).

Dentro del área de estudio, existe una subárea llamada refrigeración y aire acondicionado, la cual se encarga del control de temperatura dentro del hospital. La subárea de refrigeración comprende diversos equipos que contribuyen al funcionamiento óptimo del hospital, sin embargo, el presente estudio se enfocó en los equipos que comprenden la conservación de insumos médicos, reactivos biológicos y vacunas, dada su importancia y relevancia.

Dado el estudio de campo se observó que los refrigeradores presentan ciertas deficiencias en cuanto a mantenimientos, se observa que en la mayoría de los casos los mantenimientos que se les otorga a estos equipos de alta prioridad son correctivos, existen tiempos muertos por parte del personal técnico encargado, así como la ausencia del llenado de bitácoras lo que representa la pérdida del control y seguimiento de los equipos, aumenta el riesgo de fallas y el incumplimiento de normas.

2.1. Recolección de datos

Para el desarrollo de la investigación, los datos del estudio se obtuvieron mediante la observación directa del proceso y el análisis de tiempos de ejecución de los recorridos entre los 12 refrigeradores. Considerando la importancia de los equipos de refrigeración y los tres espacios donde se encuentran distribuidos, se obtuvieron los siguientes datos:

- ***a. Planta baja – Laboratorio***
  Área de transfusión: Se localizan 3 refrigeradores, de los cuales; 2 son de 14 ft y 1 de 20 ft.
  Área de copros y orina: Se localiza 1 refrigerador de 14 ft.
  Área de preparación de medios y cultivos: Se localiza 1 refrigerador de 14 ft.
  Área de inmunología: Se localiza 1 refrigerador de 14 ft.
- ***b. Sótano – Almacén***
  Se localiza 1 refrigerador de 17.6 ft
- ***c. Planta baja – Farmacia***
  Almacenamiento de medicamentos oncológicos: Se localiza 1 refrigerador de 20 ft.
  Almacenamiento de medicamentos inyectables: Se localiza 1 refrigerador de 14 ft.
  Almacenamiento de insulina: Se localizan 3 refrigeradores de 17.6 ft

3. Descripción formal del modelo

El problema consiste en n refrigeradores r_1 a r_n para los cuales se debe programar, de forma diaria, un recorrido para realizar un mantenimiento preventivo y, si es requerido, uno correctivo.

3.1. Clasificación de refrigeradores y tipos de fallas

Los refrigeradores se clasifican en dos tipos: de uso esporádico (A) y de uso frecuente (B), principalmente asociados a farmacias que atienden recetas del público.

Tabla 1: Matriz de distancias

	Mtto.	Bodega	Alm.	R39	R40	R41	R42	R43	R44	R30	R31	R32	R33	R34	R35
Mtto.	0	9	60	150	151	153	155	157	159	42	162	163	164	165	166
Bodega	9	0	114	140	142	144	146	148	150	50	170	171	172	173	174
Almacén	60	114	0	144	146	148	150	152	154	5	153	154	155	156	157
R39	150	140	144	0	2	4	6	8	10	100	124	125	126	127	128
R40	151	142	146	2	0	4	6	8	8	102	125	126	127	128	129
R41	153	144	148	4	2	0	2	4	6	104	126	127	128	129	130
R42	155	146	150	6	4	2	0	2	4	106	127	128	129	130	131
R43	157	148	152	8	6	4	2	0	2	108	128	129	130	131	132
R44	159	150	154	10	8	6	4	2	0	110	129	130	131	132	133
R30	110	42	5	100	102	104	106	108	110	0	120	121	122	123	124
R31	162	170	153	124	125	126	127	128	129	120	0	1	2	3	4
R32	163	171	154	125	126	127	128	129	130	121	1	0	1	2	3
R33	164	172	155	126	127	128	129	130	131	122	2	1	0	1	2
R34	165	173	156	127	128	129	130	131	132	123	3	2	1	0	1

Todos los refrigeradores, al ser revisados, tienen una probabilidad de tener una falla que requiera un mantenimiento mayor. Para los refrigeradores de tipo A, esta probabilidad se define como $p_A = 0.1$. Los refrigeradores de tipo B tienen una mayor probabilidad de sufrir un daño serio debido a su uso continuo. En este caso, la probabilidad de falla se modela creciente a través de la jornada de trabajo como:

$$p_B = 0.1 + \frac{tiempo_actual}{tiempo_turno} * (0.1) \qquad (1)$$

Donde $tiempo_actual$ es el tiempo que se lleva acumulado en el turno de recorrido y $tiempo_turno$ es el tiempo total del turno (480 minutos).

3.2. Duración de mantenimientos

Para cada refrigerador r_i, el tiempo de duración de mantenimiento preventivo se modela con una variable aleatoria uniforme $tp_i \in [5,10]$ minutos. Una vez realizado este mantenimiento, si no se requiere un mantenimiento mayor, se llena una bitácora, lo cual conlleva un tiempo modelado con una variable aleatoria uniforme $bp_i \in [15,20]$ minutos

En caso contrario, si r_i requiere un mantenimiento mayor, el tiempo requerido para realizarlo se modela con una variable aleatoria uniforme $tm_i \in [60,100]$ minutos. Terminado dicho mantenimiento, se llena otro tipo de bitácora correctiva que requiere mayor detalle, lo que implica un tiempo modelado con una variable aleatoria uniforme $bc_i \in [15,20]$ minutos. El flujo de trabajo de mantenimiento es el siguiente:

Existe un responsable de mantenimientos que, al iniciar su jornada, primero pasa a la estación de Mantenimiento M donde tiene un tiempo de preparación de 20 minutos.

Se tiene una programación del recorrido de los refrigeradores a recorrer, la cual es una permutación $\pi = (r_{\alpha(i)} \dots r_{\alpha(n)})$ de los n refrigeradores, donde α es una permutación de 1 a n.

El responsable recorre cada refrigerador de π y hace un diagnóstico preventivo. Si no hay una falla grave, se llena una bitácora y se continúa con el siguiente refrigerador.

Si se detecta que el refrigerador tiene una falla grave con las probabilidades mencionadas anteriormente, se va a la estación de Almacén para tomar la decisión de hacer un mantenimiento mayor, lo cual tiene una probabilidad del 80% y toma un tiempo $td \in [10,20]$. Si no se aprueba el mantenimiento, se retoma el recorrido para el siguiente refrigerador.

En caso contrario, de aprobarse el mantenimiento, se va a Bodega por material, el cual se recoge en un tiempo $tb \in [5,10]$ minutos por refacciones. Se regresa al refrigerador actual, se hace la reparación y el llenado de la bitácora correspondiente con los parámetros mencionados anteriormente.

Para modelar los recorridos, se cuenta con una tabla de distancias entre refrigeradores, que se traduce en tiempo al dividirla por un factor de 30, lo que indica que, en promedio, el operario recorre 30 metros por minuto (Zaragoza,2021).

4. Modelo computacional para la optimización

Bajo estos supuestos, el problema se caracteriza por varios componentes estocásticos, por lo que no es posible encontrar una solución única óptima. Existen varias formas de abordar estos problemas, como métodos matemáticos tradicionales, probabilísticos y relajados.

Sin embargo, otra tendencia es el uso de algoritmos evolutivos y metaheurísticas, que tienen la ventaja de una implementación computacional sencilla. Para este trabajo se utilizará un enfoque experimental estructurado en tres fases consecutivas; recopilación de datos de tiempos y distancias, formulación del modelo matemático con aproximaciones probabilísticas a la duración del tiempo de mantenimiento e implementación de un proceso de Monte Carlo (AGMM) que ejecute varias veces un algoritmo genético para obtener una

solución adecuada a la programación del mantenimiento de la red fría hospitalaria. Con ese fin, se expondrá primero cómo se representarán las posibles soluciones de este problema.

4.1. Codificación de soluciones

El recorrido de la red fría se representará como una permutación π de los 12 refrigeradores que componen el sistema, el recorrido de la jornada de trabajo siempre empezará desde la estación de Mantenimiento M y posteriormente se llevará a cabo el recorrido uno a uno de cada refrigerador según indique π. Si el recorrido pasa de los 480 minutos, entonces se modela un cambio de turno el cual inicia nuevamente en M como se muestra en la Figura 1.

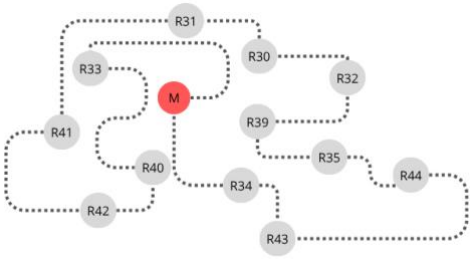


Figura 1: Ejemplo de solución.

4.2. Función objetivo probabilística

El objetivo de este trabajo es encontrar la programación de refrigeradores óptima que minimice el tiempo de recorrido para hacer los mantenimientos. Dado que el cálculo de este tiempo depende de muchas variables aleatorias, no se puede obtener un valor óptimo único; para esto, se usará una aproximación basada en el método de Monte Carlo para aproximar el valor promedio de cada solución.

5. Descripción de algoritmo genético

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio de supervivencia del más apto (Gestal, 2010). Más formalmente, y siguiendo la definición dada por Goldberg, “los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de la selección natural y de la genética natural”. Combinan la supervivencia del más apto entre secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para constituir un algoritmo de búsqueda que tenga similitud con el comportamiento de las búsquedas humanas. (Goldberg, 1989).

En una red fría hospitalaria, el problema de mantenimiento de equipos médicos de alta prioridad puede considerarse de naturaleza estocástica, debido a las variables que representa a la hora de tomar decisiones. No existe una fórmula o ruta exacta que garantice la eficacia de la misma. Los técnicos encargados carecen de una ruta adecuada de desplazamiento, así como de criterios precisos que les ayuden a determinar los equipos en los cuales deben intervenir primero. La implementación de un algoritmo genético resulta la más adecuada debido a su capacidad de resolver problemas con múltiples variables y restricciones, lo cual genera la minimización de costos, tiempos de mantenimiento, riesgo o falla en los equipos.

Procedure: Algoritmo genético
begin
t ⟵ 0;
iniciar P(t);
evaluar P(t);
while no (condición de terminación) **do**
selección de P(t+1) por elitismo y torneo de P(t)
cruce de P(t+1) para producir C(t+1)
mutación de C(t+1) para producir M(t+1)
evaluar M(t+1)
dejar los elementos de M(t+1) que mejoren a P(t+1)
t ⟵ t+1;
end while
end procedure

Figura 2: Estructura de un algoritmo genético

Sea P(t) y C(t) la población de padres e hijos en la generación actual t, la estructura general de un algoritmo genético se describe en la figura 2. La iniciación generalmente se realiza en forma aleatoria. La recombinación típicamente involucra crossover y mutación para generar los hijos (Salto, 2004).

5.1. Elitismo y Selección por torneo

Selección Elitista: El elitismo puede mejorar el funcionamiento de los algoritmos al evitar que se pierda la mejor solución. Una variación de elitismo es que el mejor cromosoma solo se copie a la siguiente generación en caso de que tras una reproducción/mutación no se haya generado un cromosoma mejor (Arranz de la Peña, 2007).

Selección por torneo: consiste en escoger a los individuos genéticos con base en comparaciones directas entre sus genotipos. Existen dos versiones de selección mediante torneo: el torneo determinístico, el cual consiste en la selección al azar de un número p de individuos (generalmente se escoge p=2). De entre los individuos seleccionados, se elige el más apto para pasar a la siguiente generación. Y el torneo probabilístico únicamente se diferencia en el paso de selección del ganador del torneo. En vez de escoger siempre el mejor, se genera un número aleatorio del intervalo [0, 1]; si es mayor que un parámetro p (fijado para todo proceso evolutivo), se escoge el individuo más alto y, en caso contrario, el menos apto (Gestal, 2010).

5.2. Cruce

Uno de los principales operadores genéticos es el cruce. La idea principal del cruce se basa en que, si se toman dos individuos correctamente adaptados al medio y se obtiene una descendencia que comparta genes de ambos, existe la posibilidad de que los genes heredados sean precisamente los

causantes de la bondad de los padres. Al compartir las características buenas de dos individuos, la descendencia, o al menos parte de ella, debería tener una bondad mayor que cada uno de los padres por separado. Si el cruce no agrupa las mejores características en uno de los hijos y la descendencia tiene un peor ajuste que los padres, no significa que se esté dando un paso atrás. Optando por una estrategia de cruce no destructivo, garantizamos que pasen a la siguiente generación los mejores individuos. Si, aun con un ajuste peor, se opta por insertar a la descendencia, y puesto que los genes de los padres continuarán en la población, aunque dispersos y posiblemente levemente modificados por la mutación, en posteriores cruces se podrán volver a obtener estos padres, recuperando la bondad previamente perdida (Gestal, 2010).

5.3. Mutación

La mutación consiste en modificar ciertos genes de forma aleatoria atendiendo a la probabilidad de mutación establecida con anterioridad. La mutación depende de la codificación y de la reproducción. Si se abusa de la mutación, podemos caer en el uso del algoritmo genético como una simple búsqueda aleatoria. Por lo tanto, antes de aumentar las mutaciones, conviene estudiar otras soluciones que aporten diversidad a la población, como podría ser el aumento del tamaño de la población o garantizar la aleatoriedad de la población inicial. (Arranz de la Peña, 2007).

6. Implementación computacional y resultados de la ejecución

En esta sección se describirá la implementación de un algoritmo genético para optimizar el mantenimiento de la red fría descrita anteriormente.

6.1. Parámetros del algoritmo genético

El algoritmo genético se implementó con una población de 20 individuos, generados inicialmente de forma aleatoria. El algoritmo corre durante 200 iteraciones y se hace una muestra de 30 cálculos de la función objetivo para cada solución en cada iteración, obteniendo su valor promedio. El algoritmo propuesto usa 2 soluciones elitistas en cada iteración, y una probabilidad de mutación de 0.1.

6.2. Selección y cruce

En cada iteración, primero se forma una nueva población. Los primeros individuos seleccionados se obtienen aplicando el elitismo para conservar las dos mejores soluciones; después, se seleccionan las 18 soluciones restantes de la nueva población mediante un torneo por pares, como se describe en la Sección 5.1.

Para el cruce, se toma cada individuo y se selecciona aleatoriamente otro de la población. Estos individuos se combinan eligiendo dos posiciones aleatorias e intercambiando las subsecuencias correspondientes para obtener dos nuevas soluciones. El cruce se encarga de refinar las buenas soluciones de mantenimiento para explotar su información de manera iterativa, como se muestra en la Figura 3.

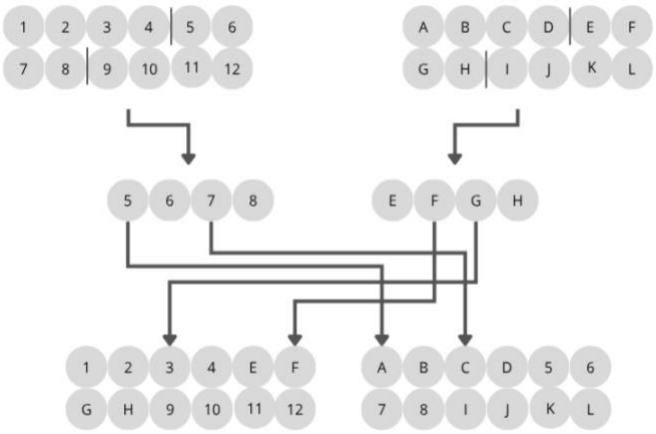


Figura 3: Cruce de soluciones

6.3. Corrección de soluciones

El cruce puede generar soluciones no factibles, en las cuales se repita el registro de un refrigerador. Para esto, cada nueva solución generada por un cruce se revisa elemento por elemento para encontrar elementos repetidos e intercambiarlos por elementos que no aparezcan en la solución, hasta obtener nuevamente una permutación (ej. Figura 4).

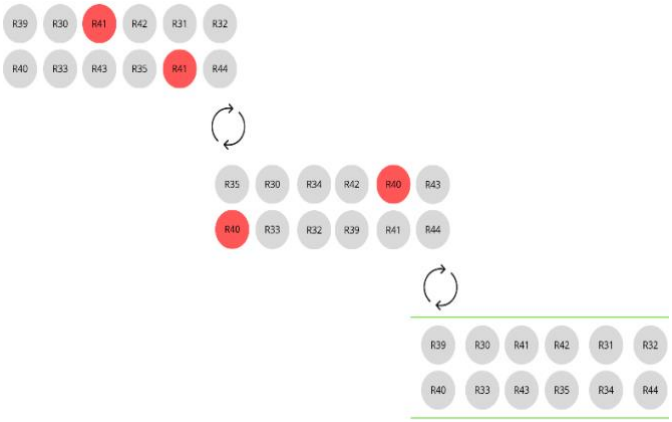


Figura 4: Corrección de soluciones

6.4. Mutación

El método habitual para mutar un cromosoma en algoritmos genéticos consiste en revisar cada gen por separado y mutarlo con una probabilidad fija. La finalidad de la mutación es salir de una zona favorable, aunque no óptima. En este estudio, empleamos una variante de la mutación clásica, en la que se intercambian las posiciones de dos elementos aleatorios en una solución con cierta probabilidad, como se observa en la figura 5. Este tipo de operación tiene la ventaja de mantener la permutación de los refrigeradores y no producir soluciones inviables.

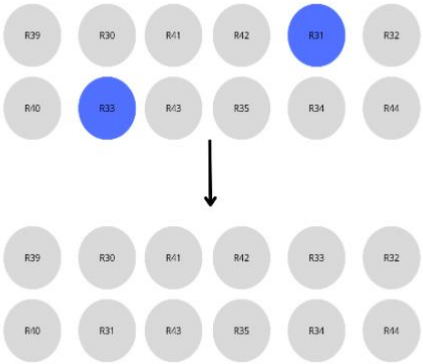


Figura 5: Ejemplo de mutación.

6.5. Criterio de paro

El criterio de terminación más frecuente en un algoritmo genético consiste en repetir este proceso durante un número finito de iteraciones predefinidas; finalmente, se selecciona el individuo con el mejor costo promedio.

7. Resultados de la ejecución

El algoritmo se implementó utilizando en Matlab 2025, en una máquina MacBook Pro M2 con 16 GB de RAM. La ejecución del algoritmo tardó aproximadamente 1.5 seg. La convergencia del proceso de optimización se muestra en la Figura 6.

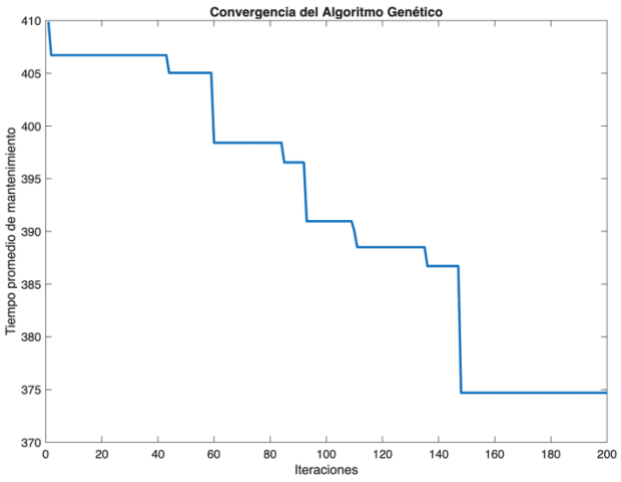


Figura 6: Convergencia del algoritmo genético

La mejor solución encontrada corresponde el recorrido: 30 32 34 35 39 42 44 41 43 40 33 31, con un tiempo promedio de recorrido de 374.7 minutos.

8. Conclusiones

Con el fin de determinar la ruta óptima para la ejecución del mantenimiento de refrigeradores de alta prioridad que pertenecen a la red fría hospitalaria, se realizó la implementación de un algoritmo genético como una herramienta de optimización. Para ello se llevó a cabo una fase inicial de recolección y análisis de datos, como las distancias entre cada equipo de refrigeración y los departamentos de mantenimiento, bodega y almacén, y los tiempos que se asociaron a los procesos operativos y administrativos (mantenimientos preventivos, correctivos y llenado de bitácoras). Partiendo de dicha información recopilada, los refrigeradores fueron clasificados según el uso y prioridad. Posteriormente, se calculó la probabilidad de falla de los equipos, considerando dichos parámetros mencionados anteriormente. Estos parámetros fueron incluidos en el algoritmo genético como variables de entrada, lo cual permitió evaluar distintas rutas de mantenimiento y seleccionar la óptima.

8.1. Resultados obtenidos de forma cualitativa

De manera cualitativa, la implementación de un algoritmo genético permitió identificar las estrategias de mantenimiento más adecuadas y eficientes, se logró observar una mejor organización de las actividades de mantenimiento y esto se consiguió clasificando dichos equipos en función del impacto operativo que existe dentro de la unidad hospitalaria. La propuesta agilizó la toma de decisiones vinculadas a la asignación de equipos a los técnicos encargados, al recurso material asignado a los mantenimientos preventivos y correctivos, reduciendo los costos de dichos recursos. Al considerar factores como distancias, tiempos de desplazamiento y los procedimientos que realiza el técnico encargado de estos equipos, se alcanzó una planificación más sistematizada de las intervenciones de los mantenimientos, reduciendo los tiempos muertos que existían. En conclusión, la implementación de algoritmos genéticos en una red fría hospitalaria tiene un gran potencial, debido a que mejora la gestión del mantenimiento, favoreciendo el funcionamiento y vida útil que contribuyen significativamente a la conservación adecuada de medicamentos, vacunas e insumos hospitalarios que requieren miles de pacientes.

8.2. Aportación general y originalidad del artículo

La aportación principal de este artículo consiste en el desarrollo e implementación de un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos para la gestión del mantenimiento en un área de suma importancia, debido a la delicadeza que requiere el tipo de equipos en los cuales se está trabajando. Esta propuesta incorpora variables operativas y logísticas, tales como distancias y tiempos de desplazamiento entre equipos y departamentos y probabilidades de falla. De esta manera, el modelo contribuye a perfeccionar la planificación de los mantenimientos, optimizar los recursos y costos y reducir las interrupciones que intervienen en la debida conservación de insumos médicos que en su mayoría son relevantes para cada uno de los pacientes que los requieren. El artículo presenta una adaptación de algoritmos genéticos en un área que ha recibido un número limitado de investigaciones dentro de las unidades hospitalarias del estado de Hidalgo y del país. A pesar de que estos sistemas son esenciales para garantizar la conservación de insumos médicos, han recibido menor atención en comparación con otras áreas hospitalarias. Se propone una metodología que incluye criterios de prioridad, probabilidades de falla y elementos logísticos para la mejora

de mantenimientos y fortalecer la vida de estos equipos de alta prioridad.

8.3. Limitaciones del estudio

Este estudio presenta algunas limitaciones que es importante considerar al interpretar los resultados obtenidos. Partiendo de la información proveniente de la unidad hospitalaria, los datos que se presentan pueden variar dependiendo de la unidad en la que se desea implementar este modelo. Las probabilidades de falla se basaron en la información que se encontraba disponible, sin tomar en cuenta algunos parámetros como las condiciones ambientales, antecedentes de mantenimientos realizados y monitoreos constantes de temperaturas que pueden influir en el desempeño de los equipos. Los algoritmos genéticos no garantizan encontrar una única solución óptima, sino soluciones cercanas óptimas que dependen de ciertos parámetros. Asimismo, una de las principales limitaciones durante el desarrollo de este estudio fue la escasa disponibilidad de trabajos enfocados específicamente en la optimización del mantenimiento de la red fría hospitalaria mediante algoritmos genéticos. La restringida existencia de trabajos relacionados con este tema dificultó algunas referencias y comparaciones entre los resultados obtenidos. Sin embargo, esta situación también permite observar la necesidad de investigación y contribución para esta área de estudio.

8.4. Trabajos futuros propuestos

Para perfeccionar estos modelos aplicados a la red fría hospitalaria, se propone la creación de bases de datos específicamente para los antecedentes y registros de los mantenimientos que faciliten el desarrollo de nuevos modelos, asimismo, un estudio que nos permita identificar y analizar cómo la implementación de estos modelos influye en las disponibilidades de insumos médicos y en la seguridad de los pacientes. Por último, también se propone una plataforma o aplicación que permita a los técnicos de mantenimiento mostrar las prioridades de los equipos, programar los mantenimientos y monitorear en tiempo real los indicadores de cada uno de los equipos.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron la herramienta Grammarly para la corrección gramatical y mejora de la redacción, traducción. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

Almeida, M. (2020). Multicriteria sorting methodology to support the maintenance management of medical equipment: The case of Hospital da Luz Lisboa.

Al-Ashi R, Awad M, Shamayleh A, Alzaatreh A (2026), Medical equipment maintenance performance and influential factors. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 32 No. 1 pp. 180–204, doi: https://doi.org/10.1108/JQME-04-2024-0042

Arranz de la Peña, J., & Parra Truyol, A. (2007). Algoritmos genéticos. Universidad Carlos III, 1-8.

Cabrera-Llanos, Agustín I.; Ortiz-Arango, Francisco; Cruz-Aranda, Fernando Un modelo de minimización de costos de mantenimiento de equipo médico mediante lógica difusa Revista mexicana de economía y finanzas, vol. 14, núm. 3, 2019, pp. 379-396 Instituto Mexicano de Ejecutivos de Finanzas, A. C

Carrión Falcón, V., Villalobos Porras, Y. V., Gómez Altamirano, C. M., & Kartoglu, U. (2020). A vaccine cold chain temperature monitoring study in the United Mexican States. Vaccine, 38(33), 5202–5211. https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.06.014

Carnero, M. C., & Gómez, A. (2017). A Multicriteria Model for Optimization of Maintenance in Thermal Energy Production Systems in Hospitals: A Case Study in a Spanish Hospital. *Sustainability*, *9*(4), 493. https://doi.org/10.3390/su9040493

Castillo, T., (2011). Gestión de mantenimiento de la red hospitalaria del estado Anzoátegui, caso: Hospital Universitario "Dr. Luis Razetti". CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 18(2), 153-163.

Chiczewski, R., Sobol, Ż., Pacholska, A., & Wątróbska-Świetlikowska, D. (2025). Estabilidad prolongada del ácido ascórbico en mezclas de nutrición parenteral total pediátrica: el papel de la temperatura de almacenamiento y la integridad de la emulsión. *Pharmaceutics* , *17* (11), 1375. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17111375

Coronel Mendoza, E. S., & Segura Pérez, E. (2018). Metodología para la inspección de equipo médico. Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica, 5(1), 534–537. https://doi.org/10.24254/CNIB.18.116

Dimo Maint. (2026). *¿Cómo mejora la GMAO el mantenimiento hospitalario y responde a los desafíos de seguridad y cumplimiento normativo?* Dimo Maint. https://www.dimomaint.com/es/blog/mantenimiento-hospitalario/. Consultado el 23 de agosto de 2026.

Escobar Mora, N. J., Alvarado Henao, J. C., & Hernández-Marulanda, A. F. (2025). El estado del arte del mantenimiento de activos hospitalarios de Colombia: Breve revisión. Ingenierías USBMed, 16(2), 32–44. https://doi.org/10.21500/20275846.7511

Fracttal. (2025, 13 de Noviembre). *El estado del mantenimiento: datos y tendencias que marcan el futuro.* Centro de ayuda de Fracttal. https://help.fracttal.com/hc/es-es/articles/25013544567693 C%C3%B3mo-crear-un-activo-en-Fracttal-One.

Gestal, M., (Daniel; Rabuñal, Juan Ramón; Dorado, Julián; Pazos, Alejandro), & Gestal, M. (2010). Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética (p. 32). Coruña: Universidade da Coruña.

Goldberg, D. A. (1989). Genetic Algorithm-in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc

Gómez, A., Carnero, C., (2006). Clasificación de equipos de instalaciones en un Complejo Hospitalario de última generación. *X Congreso de Ingeniería de Organización*. 2006.

Hernández-Nariño, A., Medina-León, A., Nogueira-Rivera, D., Negrín-Sosa, E., Marqués-León M. La caracterización y clasificación de sistemas, un paso necesario en la gestión y mejora de procesos. Particularidades en organizaciones hospitalarias. Dyna [en linea]. 2014, 81(184), 193-200

Instituto Mexicano del Seguro Social. Norma para el manejo de medicamentos, dispositivos médicos y demás insumos para la salud en la red de frío [Clave 1000-B01-028]. México: IMSS; 2026.

Martín Díaz, J., González Martín, D., Ferrero Fernandez, U. (2025). La importancia del mantenimiento en centros hospitalarios. Revista Ocronos, 8(10), 416. https://revistamedica.com/importancia-mantenimiento-centros-hospitalarios-asistencia-clinica/

Mellado-Silva, R., Cubillos, C., Cabrera-Paniagua, D., & Urra, E. (2022). Flow-Shop Scheduling Problem Applied to the Planning of Repair and Maintenance of Electromedical Equipment in the Hospital Industry. *Processes*, *10*(12), 2679. https://doi.org/10.3390/pr10122679

Orth, L. E., Ellingson, A. S., Azimi, S. F., Martinez, J. T., Alhadad, A. A., Tran, B. C., Allen, C. W., Nguyen, C. T., Duong, T., Burkdoll, J. S., Yoo, J., Blackmer, A. B., Jeffres, M. N. (2022). Allowable room temperature excursions for refrigerated medications: A 20-year review. American Journal of Health-System Pharmacy, 79(15), 1296–1300. https://doi.org/10.1093/ajhp/zxac118

Pérez Gracia, B., & colaboradores. (2026). Monitorización de la temperatura en cadena de frío de vacunas. Revista Ocronos. https://revistamedica.com/monitorizacion-temperatura-cadena-frio-vacunas/

Salto, C. (2004). *Algoritmos evolutivos avanzados como soporte del proceso productivo* (Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata). SEDICI. https://doi.org/10.35537/10915/4060

Trejo-Morales, R., et al. (2018). Procedimiento para evaluar y controlar de forma eficiente la gestión operativa de equipos médicos en la unidad de mantenimiento de una entidad de salud. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 19(1).

Zaragoza, F. J. (2021). Taller de análisis y diseño de algoritmos: Algoritmos para problemas combinatorios. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Departamento de Sistemas. Basado en Principles and Techniques in Combinatorics de Chen Chuan-Chong y Koh Khee-Meng.

World Health Organization. (2012). *Computerized maintenance management system: WHO medical device technical series*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789241501415