

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

<https://doi.org/10.35381/a.g.v8i15.5157>

Desempeño de la cadena de frío en la industria alimentaria, análisis de fallos y variabilidad

Performance of the cold chain in the food industry: failure analysis and variability

Bismayda Gómez-Avilés

bismaida@uniss.edu.cu

Universidad de Sancti Spíritus José Martí Pérez, Sancti Spíritus, Sancti Spíritus
Cuba

<https://orcid.org/0000-0001-7497-1895>

Elianis Yanet Fleites-Álvarez

eliyanet88@gmail.com

MIPYME Agroindustrial Media Luna S.R.L, Ciego de Ávila, Ciego de Ávila
Cuba

<https://orcid.org/0009-0009-5553-656X>

Dainier Rives-Catalá

dainier669@gmail.com

Empresa Pesquera Industrial de Sancti Spíritus, Sancti Spíritus, Sancti Spíritus
Cuba

<https://orcid.org/0009-0007-1650-5950>

Nila Marisol Plaza-Macías

nila.plaza@utm.edu.ec

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí
Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-1671-1635>

Recibido: 1 de marzo 2026

Revisado: 20 de marzo 2026

Aprobado: 30 de marzo 2026

Publicado: 01 de julio 2026

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

RESUMEN

La cadena de frío es esencial para garantizar la calidad y seguridad de alimentos perecederos. Su desempeño depende del control de fallos, la disponibilidad de los equipos y la variabilidad del proceso. El objetivo es desarrollar un procedimiento para gestionar el desempeño del equipamiento de la cadena de frío en la industria alimentaria. Se realizó una investigación exploratoria cuantitativa con valoraciones cualitativas integrando AMFE, VMEA, análisis jerárquico, función de pérdida de Taguchi y capacidad del proceso. En la maquila de camarón se identificaron modos de fallo activos que incrementaron la variabilidad y duplicaron las pérdidas de calidad. La disponibilidad operacional fue de 0,769 y el índice de capacidad penalizado alcanzó 0,2276 evidenciando necesidad de intervención. El procedimiento permite priorizar riesgos, cuantificar pérdidas y monitorear el desempeño, constituyendo una contribución metodológica orientada al mantenimiento predictivo y la industrial 4.0.

Descriptores: Equipamiento de frío; función de pérdida; industria de alimentos; modos y efectos de fallos; variabilidad de proceso. (Tesauro AGROVOC).

ABSTRACT

The cold chain is essential to guarantee the quality and safety of perishable foods. Its performance depends on failure control, equipment availability and process variability. The objective is to develop a procedure to manage the performance of cold chain equipment in the food industry. A quantitative exploratory research was carried out with qualitative assessments integrating FMEA, VMEA, hierarchical analysis, Taguchi loss function and process capacity. In the shrimp maquila, active failure modes were identified that increased variability and doubled quality losses. Operational readiness was 0.769 and the penalized capacity index reached 0.2276, evidencing the need for intervention. The procedure allows prioritizing risks, quantifying losses and monitoring performance, constituting a methodological contribution aimed at predictive maintenance and industrial 4.0.

Descriptors: Refrigeration equipment; loss function; food industry; failure modes and effects analysis; process variability. (AGROVOC Thesaurus).

INTRODUCCIÓN

En la producción de alimentos es garantía de seguridad alimentaria para los consumidores, no separar el cómo se manipulan estos, del sistema de gestión. Al respecto para Lim et al. (2019), la medición, monitorización y el control de los procesos de calidad son vitales; sin embargo la importancia de la calidad en el procesamiento de alimentos, en la práctica está limitado por la falta de conocimiento de los ejecutores. Estos autores a través de una guía de implementación presentan un proyecto piloto para el Control Estadístico de Proceso (CEP), con aportes que pueden atenuar cuestionamientos relativos a la efectividad en el uso de herramientas y métodos. Sin restringir la flexibilidad en la utilidad y prestaciones, su uso debe ajustarse a la información disponible para establecer los propósitos y premisas de las aplicaciones.

Por la necesidad de conservación de los alimentos a bajas temperaturas, para prolongar su vida útil y mantener su calidad, las condiciones de manipulación de la temperatura, se monitorea en el almacenamiento y venta a los consumidores finales (Hisham et al., 2025), por tanto es crucial el desempeño de las cadenas de frío; sin embargo, las prácticas actuales de gestión de riesgos en estas, se perciben menos eficaces de lo deseado y son relativamente pocos los estudios, en comparación con otras áreas del sector alimentario (Arslan et al., 2023; Soltanali et al., 2023); situación similar presenta la disponibilidad operativa y la eficacia de los equipos. En este sentido, la gestión inefectiva de los servicios en la logística de cadena de frío, pueden generar problemas de seguridad y calidad que requiere de criterios para comparar y evaluar la viabilidad de alternativas tecnológicas en industrias de países en desarrollo (Gurralla y Gonela, 2024).

Metodologías como el *Total Quality Management*, *Six Sigma*, *Lean Six Sigma*, utilizadas en la industria alimentaria, fortalecen el potencial del CEP como componente de los programas de calidad, para reducir el desperdicio mediante el control de la variación del proceso, así como el Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control, en la garantía de calidad y seguridad alimentaria (Abdul Halim Lim et al., 2015). En procesos donde es característico que la variabilidad cambie con el tiempo, se requiere explorar con el

monitoreo, la criticidad de la variación para la calidad (Wan, 2020), como el rendimiento en términos de precisión y control de calidad. Índices como los calculados por (Almazah et al., 2021), en base a *Six Sigma*, resultan una evaluación que supera estudios precedentes y es un llamado de atención a interesados en el tema (Quevedo et al., 2021). La necesidad de un enfoque holístico para garantizar una comprensión integral (Arslan et al., 2023), donde se considere el mantenimiento, por el efecto que puede provocar el deterioro de los equipos de producción en la calidad de los productos, ante una mayor variabilidad en los procesos, es un tema que la literatura trata por separado (Wan, 2020). Sin embargo, la garantía de la sostenibilidad está en que, durante la operación se comprenda la función real del equipo en el proceso y su relación con el producto. En este contexto, es significativo que los riesgos potenciales como refieren (Sharifi et al., 2022), están en los daños que pueden causar a la salud humana y las consecuencias económicas negativas.

En la perspectiva de Wan (2020), el modelo de integración del CEP-mantenimiento, incluye los cambios y las fallas de los equipos, según el estado del proceso. Este autor, refiere mejoras de calidad en la producción con reducción de los costos de mantenimiento; sin embargo, reconoce la imperfección del mantenimiento, pues el sistema productivo se degenera con el propio mantenimiento, por lo que las estrategias a aplicar, necesitan conocer la diversidad de procesos y condiciones en las industrias, para minimizar fallos totales del sistema, con modelos que consideren las fallos parciales del sistema, como el propuesto por Chopra (2022).

Lo anterior implica en los sistemas de procesamiento de alimentos, evaluar el proceso de riesgo y la confiabilidad, para prevenir eventos inesperados y controlar la seguridad funcional, con mantenimientos planificados, que considere los fallos potenciales mediante enfoques basados en riesgos (Soltanali et al., 2023). Este estudio resulta útil para la mejora de la seguridad y la disponibilidad de los procesos en la industria alimentaria, al dar prioridad a los cuellos de botella, para evitar averías imprevistas y errores relacionados con la calidad del producto.

Se considera en estos estudios, la utilización del Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE), por su contribución en la industria alimentaria a la evaluación de riesgos; sin embargo en las cadena de frío de los alimentos, aunque poseen alta susceptibilidad a peligros potenciales, se le ha prestado poca atención. En el AMFE de proceso se: identifican modos de fallo, determinan causas y efectos, clasifican riesgos y finalmente sugieren acciones en lo fundamental de mantenimiento (Arslan et al., 2023).

En estudio previo al presente trabajo, con un modelo basado en análisis de variabilidad para gestionar la calidad del proceso industrial del camarón; se evidenció un deficiente programa de mantenimiento (el 66,67% de las causas) (Paladini et al., 2019). Por lo que, la presente investigación se planteó el propósito desarrollar un procedimiento para gestionar el desempeño del equipamiento de la cadena de frío en la industria alimentaria. La investigación se realiza a partir del análisis de los modos y causas de los fallos potenciales que provocan indisponibilidad y variabilidad en el proceso industrial con efectos en la conformidad del producto y en las pérdidas económicas.

MÉTODO

El procedimiento de la Figura 1, consta de tres etapas. Los Números de Prioridad de Riesgo (NPR_i) de los modos de fallos en equipos de la cadena de frío, obtenidos en la Etapa I por el AMFE, incorporan el efecto de la variabilidad con el Análisis Modal de Variaciones y Efectos (VMEA, *Variation Mode and Effects Analysis*) y se obtiene un NPR_i modificado (NPR_i^*). En la Etapa II, para el cálculo del costo económico tangible, la Función de Pérdida de Taguchi, incorpora un factor de penalización de los modos de fallo activos que inciden en la disponibilidad, con efecto indirecto en la conformidad del producto. El monitoreo de la variabilidad, en la Etapa III, relaciona la capacidad del proceso penalizada con la pérdida de disponibilidad. Como ciclo de mejora, los retornos se establecen para las tres etapas, en función del valor de C_{pm}^* .

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

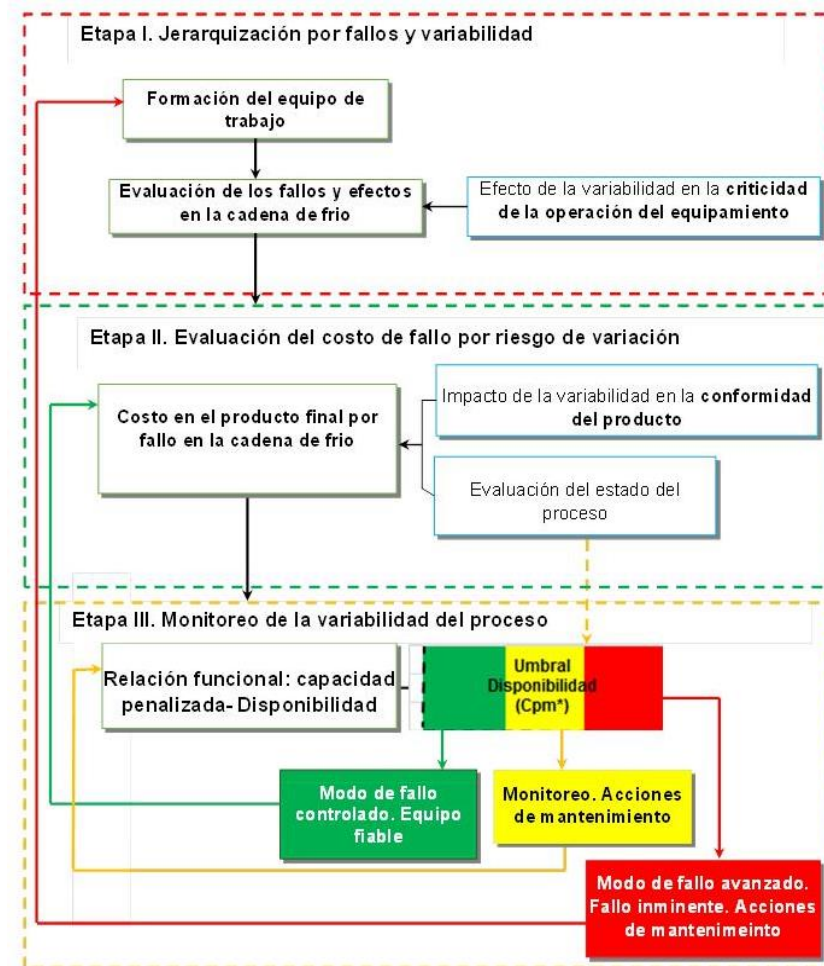


Figura 1. Procedimiento para gestionar el desempeño del equipamiento de la cadena de frío en la industria alimentaria con análisis de fallos y variabilidad del proceso.
Elaboración: Los autores.

Etapa I. Por la influencia que tienen en la consistencia de los resultados, se seleccionan especialistas en (mantenimiento, calidad, operaciones), teniendo en cuenta los conocimientos pertinentes del proceso (Bike y Ruichang, 2023). Se documenta el proceso con el desarrollo del AMFE, por la incidencia de la ruptura de la cadena de frío en la disponibilidad operativa, que puede implicar parada de la operación en la industria o alargamiento del tiempo de congelación (Uribe y Medina, 2022).

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

En los análisis de los modos fallos (i) se asignan valores a la (S_i : Severidad, O_i : ocurrencia y D_i : detección) (Wu y Hsiao, 2021), se valoran con mayor peso, las causas asociadas a: mantenimientos inapropiados, equipos obsoletos, monitoreo inadecuados y deficiencias en la información del personal responsable. Del AMFE se obtiene los (NPR_i) (Ecuación 1), clasificados según la criticidad propuesta por (Alvarenga Cortéz y Lebrón Flores, 2021). La contribución de la variabilidad, penaliza el NPR_i con el VMEA (Paladini et al., 2019) (Ecuación 2, para una modificación del NPR_i^* , que cuantifica impacto de la relación entre variación y causas (Luo et al., 2014).

$$NPR_i = (S_i * O_i * D_i) \quad [1]$$

$$NPR_i^* = NPR_i * \left(V RPN_{NFi} / \sum V RPN_{NFi} \right) \quad [2]$$

Donde: $VRPN_{NFi}$: Número de Prioridad del Riesgo de Variación para los factores de ruido (causas de fallo).

Etapla II. Los modo de fallos activos (identificados en el AMFE y penalizados con el VMEA), tienen consecuencia dual: en la disponibilidad operativa de la cadena de frio y efecto indirecto en la conformidad del producto o proceso (Flores et al., 2020), que provocan un incremento en la variabilidad, por lo que los modos de fallos se incorporan (Ecuación 3) en forma de penalización en la Función de Pérdida de Taguchi.

$$L_{total}(y, D) = L_{calidad}(y) + L_{indisponibilidad}(D) \quad [3]$$

Donde: $L_{total}(y, D)$: pérdida en términos monetarios por la variabilidad que provoca el modo de fallo, con efecto en la conformidad en el producto (Ecuación 4) y la disponibilidad operativa del equipamiento de la cadena de frio (Ecuación 10).

$$L_{calidad}(y) = K * w(F) * (y - m)^2 \quad [4]$$

Donde: y : valor de la variable de proceso relacionada con el incremento de variabilidad, que afecta la conformidad del producto; m : valor meta de la variable; K : coeficiente de costo asociado al incremento de variabilidad (Ecuación 5); $w(F)$: factor de penalización por modos de fallo activos (Ecuación 6).

$$K = A / \Delta^2 \quad [5]$$

Bismayda Gómez-Avilés; Elíanis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

Donde: A: Pérdida asociada con una unidad de producto en el límite de especificación, se supone que la pérdida para una unidad en el valor meta y es cero; Δ : Tolerancia definida para la variable.

$$w(F) = 1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i * f(NPR_i, P(F_i)) \quad [6]$$

Donde: γ_i : Importancia relativa de cada modo de fallo en la cadena de frío, según la relevancia específica de los factores de riesgo: S_i , O_i y D_i , en la conformidad del producto, por el efecto en la variabilidad y el descentrado. Por comparaciones pareadas con AHP (*Analytic Hierarchy Process*) se determina la importancia de estos factores: (1) Para los Modo de fallo (i) se pregunta: ¿Cuál es la magnitud del impacto de los factores de riesgo (S_i , O_i y D_i) en cada Modo de fallo (i) sobre la variabilidad (σ) y el descentrado (μ)? con la escala fundamental de Saaty (1=igual importancia a 9=importancia extrema); (2) el cálculo del $NPR_{ponderado,i}$ para cada modo de fallo (i) (Ecuación 7); (3) se normaliza para obtener γ_i (Ecuación 8).

$$NPR_{ponderado,i} = w_{Si} * S_i + w_{Oi} * O_i + w_{Di} * D_i \quad [7]$$

$$\gamma_i = \frac{NPR_{ponderado,i}}{\sum_{j=1}^n NPR_{ponderado,j}} \quad [8]$$

$f(NPR_i, P(F_i))$: la pérdida de calidad por el modo de fallo i (Ecuación 9), cuantifica directamente el impacto físico del fallo sobre la variabilidad y el descentrado, objetivo final de la función de Taguchi.

$$f(NPR_i, P(F_i)) = \sigma/\sigma_0 - 1 + |\mu - T|/T \quad [9]$$

Donde: σ = desviación estándar del proceso; μ = media del proceso (ambas características bajo modos de fallo); σ_0 = desviación estándar del proceso en condiciones ideales (sin fallos); T = valor nominal objetivo de la variable.

La σ y la μ , se obtienen de la evaluación del estado del proceso. El Gráfico de Control (GC) a utilizar depende de las características de la variable a evaluar (continua o discreta). La pérdida por indisponibilidad del equipamiento se según la Ecuación 10.

$$L_{indisponibilidad}(D) = \sum_{j=1}^m C_{indirecto,j} * 1\{(D) < D_{min}\} \quad [10]$$

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

Donde: $1 \{D < D_{\min}\}$ función indicadora que vale 1 cuando la disponibilidad cae por debajo de un umbral crítico; $C_{\text{indirecto},j}$: costos indirectos por la indisponibilidad que afectan la conformidad de productos, estimados por los daños económicos en la venta de productos que tiene la industria por la ruptura de la cadena de frío: (1) Pérdida de ingresos por la imposibilidad de procesar la materia prima; (2) Pérdida por cambio de destino del producto, al presentarse defecto crítico de bajo rango de admisión por el cliente en los productos en proceso.

Con la Ecuación 11 se obtiene la Disponibilidad operacional (D_o), para evaluar las posibilidades de cumplir la función asignada según las condiciones existentes.

$$D_o = TMEF / (TMEF + TMI) \quad [11]$$

Donde: TMEF: Tiempo Medio Entre Fallos, TMI: Tiempo medio improductivo (diagnóstico y reparación, mantenimiento preventivo y el tiempo de espera; rapidez en la ejecución de la reparación y restauración), tiempo para el soporte logístico.

Etapa III. El monitoreo de la variabilidad del proceso se realiza con el índice de capacidad del proceso de Taguchi modificado C_{pm}^* (Ecuación 12), donde se penaliza el impacto de los factores de riesgo (S_i , O_i , D_i) de cada modo de fallo (i) sobre la variabilidad y el descentrado (de la Etapa II). La propuesta considera el efecto que puede generar no conformidades en el producto final para establecer estrategias de intervención (Isaic-Maniu et al., 2023), alineadas con Wu (2020), respecto a la necesidad de potenciar los índices de capacidad, con la incorporación de criterios que permitan evaluaciones más efectivas de los procesos; en este caso se proporciona una medida integral del riesgo.

$$C_{pm}^* = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 * w(F)_\sigma + (\mu - m)^2 * w(F)_\mu}} \quad [12]$$

Donde: LSE; LIE: Límites Superior e Inferior de Especificación de la variable; μ : valor medio y σ^2 : varianza de la variable; m : valor nominal de la variable; $w(F)$: factor de penalización por modos de fallo activos (Ecuación 6).

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

La disminución gradual de C_{pm}^* a medida que los fallos se incrementan, indica la pérdida de la disponibilidad (Figura 2), congruente con el resultado de la Ecuación 11.



Figura 2. Relación funcional C_{pm}^* - Disponibilidad por progresión de modos de fallos.
Elaboración: Los autores.

Para el cierre del procedimiento se establecen retornos a las tres etapas, en función del valor de C_{pm}^* : (1) $C_{pm}^* > 1,33$. Evidencia modos de fallos controlados, con alta disponibilidad del equipamiento, donde se requiere mantener la evaluación de los costos de fallos por riesgo de variación (retorno a Etapa II); (2) $1 < C_{pm}^* < 1,33$. La presencia de modos de fallos activos, mantiene una tendencia al incremento de la variabilidad (σ) y por tanto puede ocurrir el fallo, por lo que, ante una disponibilidad media del equipamiento, se requiere mantener el monitoreo y acciones de mantenimiento preventivo o predictivo intensivo (programar intervención) (mantenerse en Etapa III, con información sobre el estado del proceso); y (3) $C_{pm}^* < 1,00$. Los modos de fallos avanzados representan una alta probabilidad de ocurrencia del fallo e implica baja disponibilidad que requiere acciones de mantenimiento predictivo inmediato (programar la intervención en el momento más oportuno antes de que ocurra la falla funcional). Se retroalimenta al AMFE y significa el retorno a la Etapa I.

RESULTADOS

El equipo de trabajo recibe una preparación sobre las etapas, e inician con la caracterización del proceso. En la maquila del camarón entero refrigerado, el flujo del proceso se inicia con cajas plásticas de 20 kg (0°C a 5°C) en el centro térmico del camarón, que pasan al tanque de recepción con agua helada (0°C a 2°C). Para evitar variaciones de temperatura, en el proceso se rocía agua helada. Clasificados por tallas los camarones, se envasan y pasan a congelación o conservación, según los estándares operacionales de trabajo para el procesamiento industrial mecanizado y manual del camarón (Ortiz y Soto, 2021), autores que citan la NC: 469,2006.

Los modos de fallos documentados de los equipos de la cadena de frío en la Tabla 1, muestran los NPR_i y los NPR_i^* jerarquizados, por los efectos en la reducción de la disponibilidad. La consulta con especialistas (Tabla 2), procesada por el algoritmo de Estupiñán Ricardo et al. (2021), se ejemplifica en la Tabla 3, para el modo de fallo (Falla de la cuchilla), donde se obtuvo un ($\lambda_{\text{máx}}$) de 3,035; el valor de la Razón de Consistencia $\text{RC} = 0,034$ que resultó $< 0,5\%$, porcentaje máximo establecido en (Aznar y Guijarro, 2012) para una matriz ($n=3$). Se registraron valores similares de RC en el resto de los modos de fallos. En la Tabla 4, los γ_i se presentan sin una marcada diferencia, en la incidencia relativa de los factores de riesgo tanto para la variabilidad y como para el descentrado, por y entre los modos de fallos.

Conocidas las exigencia del proceso de $\sigma_0=0,12$ y $T=2^{\circ}\text{C}$ para la temperatura, con incidencia directa en el defecto crítico cabeza roja, defecto de bajo rango de admisión por el cliente y que representa entre 3 al 4% de la producción; se evaluó el estado de proceso por el GC ($X-R_m$) (Figura 3) en el tanque de recepción (determinante para todo el proceso). El comportamiento del GC (X) muestra un patrón alrededor de la línea central ($\text{LC}=1,9593\text{ }0\text{C}$), valor aproximado al $\text{LES}=20\text{C}$, con una significativa amplitud de los Límites de Control, situación también presente en el GC (R_m), para $\sigma=0,1920$ y que se corrobora con el índice de capacidad de proceso penalizado ($C_{pm}^*=0,2276$).

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

Tabla 1. Evaluación obtenida por el AMFE y el VMEA para los equipos de la cadena de frío.

VMEA. Disponibilidad equipos de cadena de frio							Efecto de la variabilidad en la criticidad de la operación del equipamiento							
KPC	Sub-KPC (Modo de fallo)	Sensibilidad KPC a Sub- KPC	NF (Causa de fallo)	Sensibilidad Sub-KPC a NF	Tamaño Variación NF	VRPN (NF)	VRPN (Sub-KPC)	VRPN (NF _i)/ΣVRP N (NF _i)	AMFE				NPR*	Σ NPR*
									S	O	D	NPR		
Reducción disponibilidad equipos de cadena de frio	Rotura de la bomba de abasto de agua	9	Deterioro de los rodamientos del motor	9	2	26244	131220	0,09	10	4	4	160	14,989	52,4606
			Rotura del componente eléctrico	9	4	104976		0,37	10	5	2	100	37,472	
	Rotura del moto reductor	10	Rotura del componente eléctrico	10	2	40000	120000	0,14	6	5	4	120	17,134	25,7009
			Falta de mantenimiento	10	2	40000		0,14	6	4	4	96	13,707	
			Calidad de los rodamientos	10	2	40000		0,14	10	6	3	180	25,701	
	Falla en la cuchilla	5	Calidad de los rodamientos	7	3	11025	16650	0,04	9	10	6	540	21,251	10,8426
			Falta de mantenimiento	5	3	5625		0,02	10	9	6	540	10,843	
	Falla de los compresores NH3	3	Sobre explotación del equipo	6	5	8100	11988	0,03	9	7	8	504	14,572	18,0328
			Vibraciones	6	2	1296		0,00	7	8	6	336	1,5544	
			Rotura del componente eléctrico	6	2	1296		0,00	4	7	7	196	0,9067	
			Deficiente operación del equipo	6	2	1296		0,00	4	6	9	216	0,9993	
	Rotura de la torre condensadora	2	Parada del ventilador	3	2	144	288	0,00	4	9	9	324	0,1665	0,2529
			Parada de la bomba de agua	3	2	144		0,00	6	4	7	168	0,0864	

Elaboración: Los autores.

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

Tabla 2.

Hoja recopilación de datos. Consulta a especialistas respecto al valor del efecto sobre la media (μ) y la variabilidad (σ), de los Modos de fallos en la temperatura del proceso. Ejemplo: Modo de fallo (Falla de la cuchilla).

Evaluación de riesgo	Efecto sobre la media (μ)					Evaluación de riesgo	Evaluación de riesgo	Efecto sobre la variabilidad (σ)					Evaluación de riesgo
	Igual importancia (Imp.)	Imp. moderada	Imp. grande	Imp. muy grande	Imp. extrema			Igual Imp.	Imp. moderada	Imp. grande	Imp. muy grande	Imp. extrema	
	1	3	5	7	9			1	3	5	7	9	
S			x			O	S			x			O
S				x		D	S						D
O		x				D	O		x		x		D

Valores intermedios entre los anteriores cuando sea necesario matizar (2,4,6 y 8)

Orientaciones: Compare por pares: Severidad (S) vs Ocurrencia (O); Severidad (S) vs Detección (D) y Ocurrencia (O) vs Detección (D). **Marcando con una (X)**

Elaboración: Los autores.

Tabla 3.

Asignación de pesos para el modo de fallo: Falla de la cuchilla.

Efecto sobre la media y la variabilidad (presentaron igual asignación de pesos) (Matriz A)				
	S	O	D	Pesos
S	1,00	5,00	7,00	0,72417
O	0,20	1,00	3,00	0,19332
D	0,14	0,33	1,00	0,08250

Elaboración: Los autores.

Tabla 4.

$NPR_{ponderado,i}$, γ_i de los factores de riesgo para σ y μ de los modos de fallos.

Modo de fallo _i	σ		μ	
	$NPR_{ponderado,i}$	γ_i	$NPR_{ponderado,i}$	γ_i
Rotura de la bomba de abasto de agua	14,9028	0,1663	16,2463	0,1790
Rotura del moto reductor	19,9487	0,2226	19,9487	0,2198
Falla de la cuchilla	18,4225	0,2056	18,4225	0,2030
Falla de los compresores NH3	25,2537	0,2818	25,1902	0,2776
Rotura de la torre condensadora	11,0854	0,1237	10,9492	0,1206

Elaboración: Los autores.

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

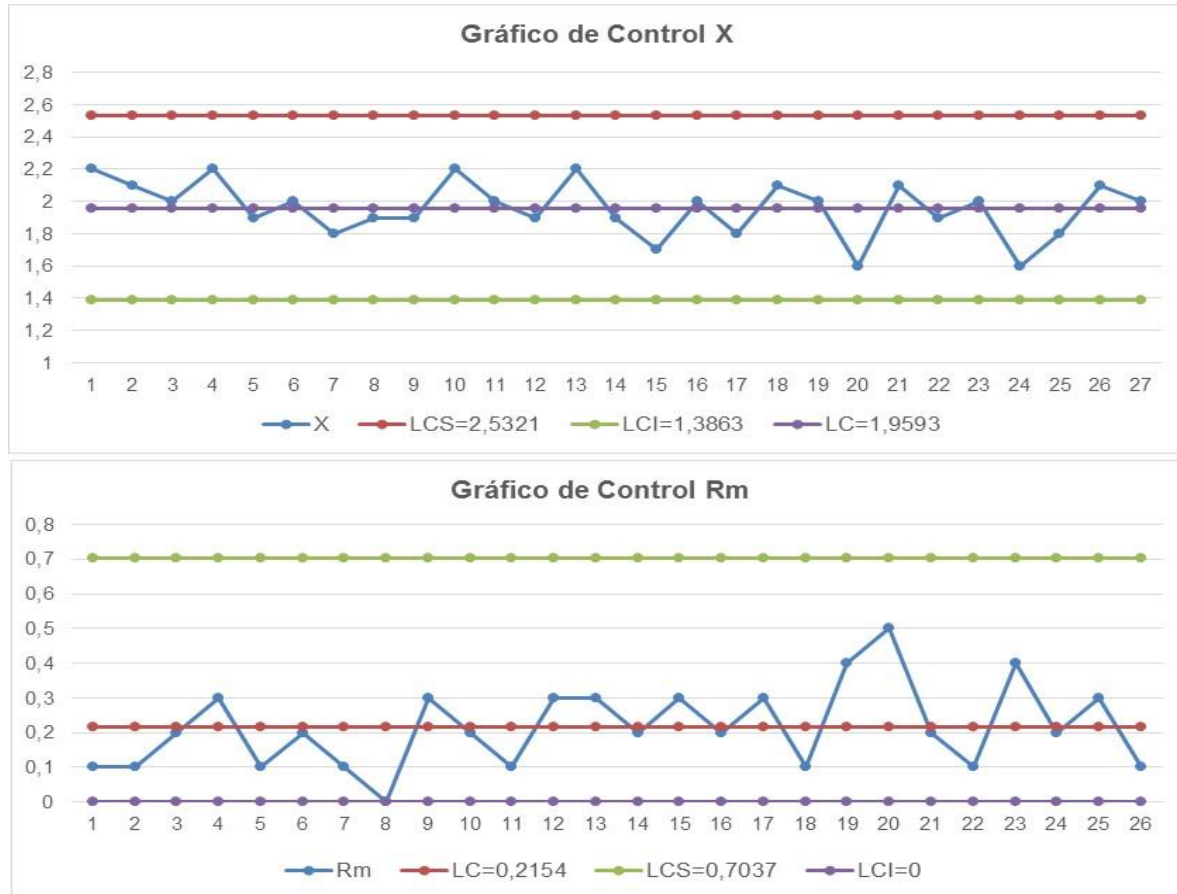


Figura 3. Gráfico de Control X- R_m con n=2. Temperatura en el tanque de recepción.
Elaboración: Los autores.

El proceso reportó una $L_{calidad} = 3,6627$ USD/kg, obtenida con un factor de penalización por modos de fallo activos de $w(F) = 2,241$ y el máximo valor identificado de $k^*(y-m)^2$. La $L_{indisponibilidad} = 1,3$ USD/kg, consideró los costos estimados por no procesamiento de materia prima y por cambio de destino, la producción diaria y los días laborados en el año; datos valorados desde la disponibilidad operacional.

DISCUSIÓN

En el estudio se exploró la consecuencia dual que plantea Flores et al. (2020), con la valoración del efecto indirecto que en la conformidad del producto, tiene la disponibilidad a través de dos mecanismos: *efecto directo durante operación degradada*: la industria con equipos en modos de fallo activos (identificados por AMFE y VMEA) aumenta la variabilidad del proceso y desplaza la media, lo que incrementa la pérdida de Taguchi; y *efecto indirecto por indisponibilidad*: el fallo del equipo (pérdida de disponibilidad), produce efectos colaterales en la conformidad de productos en proceso.

El procedimiento propuesto, por las insuficiencias que reconocen diferentes autores en estudios sobre el tema (Arslan et al., 2023; Gurralla y Gonela, 2024; Hisham et al., 2025; Soltanali et al., 2023; Wu y Hsiao, 2021), se fundamenta en el conocimiento de los modos de fallos de los equipos de la cadena de frío en la industria de alimentos perecederos y constituye una alternativa para respaldar la gestión de procesos en estas industrias de países en desarrollo, con el propósito de reducir productos no conformes cuyas pérdidas económicas están presentes de forma crónica, identificadas en Paladini et al. (2019) para el caso de la maquila de camarón.

El estudio se centra en los equipos que determinan el manejo de la temperatura, por las arbitrariedades en el tratamiento a la temperatura, falta de información sobre la temperatura del producto y daños al producto, que plantea Wu and Hsiao (2021) y que implican pérdidas económicas y riesgos al consumo humano antes de llegar a la venta (Arriaga-Lorenzo et al., 2023).

Los NPR_i críticos evaluados por el AMFE: Falla de la cuchilla y Falla de los compresores NH₃, con puntuaciones de severidad altas y que refiere Gutiérrez Pulido and De la Vara Salazar (2009), citado por Gutierrez et al. (2021), vincula a la necesidad de inversión con cambios en el diseño, para lo cual se requiere una fundamentación sólida. En este sentido, para la decisión se consideró el resultado con los valores más altos de sensibilidad, asignados en VMEA a los Sub- KPC y a las causas (NF), estableciendo la

jerarquía, por los NPR_i^* : (1) Rotura de la bomba de abasto de agua, (2) Rotura del moto reductor, (3) Falla de los compresores NH_3 y (4) Falla de la cuchilla.

Los factores de riesgos (S_i , O_i , D_i) con efectos similares en la variabilidad y el descentrado, por y entre los modos de fallos del equipamiento de la cadena de frío, es un resultado que debe considerarse con prudencia, por ser la primera vez que estos especialistas realizan esta valoración. También importante tener en cuenta las condición actual del proceso, al presentar adherencia de las observaciones a la LC en el gráfico de X , por regulación externa, realizada por el operario o inspector, con el propósito de mantener los requisitos establecidos; acciones que como plantean Shivangi Srivastava et al. (2024) se alejan de un enfoque de proceso y provocan un efecto engañoso, como lo demuestra la amplitud de los límites de control del GC ($X-R_m$), con un incremento en la variabilidad de $\sigma/\sigma_0 = 1,6$.

El valor $w(F) = 2,241$, evidencia que la presencia de modos de fallo activos, duplican las pérdidas por calidad; como consecuencia indirecta de la indisponibilidad de los equipos de la cadena de frío, en la conformidad del producto (Flores et al., 2020) y que se cuantifica en la Función de pérdida de Taguchi afectada por este factor. El costo anual resultante, solo por defecto cabeza roja, es de 191,74 USD/t, para un 73,8% de las pérdidas totales anuales. Estas pérdidas expresan las limitaciones de la industria para cumplir con las metas del proceso, así expresadas en el pobre valor del índice de capacidad de proceso (0,2276), penalizado para monitorear la variabilidad y reflejar el impacto de la condición del equipo sobre la calidad del producto y con ello tener la posibilidad de modificar la presencia de riesgos potenciales del proceso como indica Sharifi et al. (2022).

Evaluación de C_{pm}^* , si bien precisa de mediciones que evalúen su comportamiento, para diferentes niveles de disponibilidad; los autores lo presentan con un potencial interesante, al considerar en el cálculo, el peso del impacto de los factores de riesgo (S_i , O_i , D_i) por modo de fallo de los equipos de la cadena de frío, donde el control riguroso de la

temperatura es estrictamente necesario (Arriaga-Lorenzo et al., 2023) para prevenir eventos inesperados y controlar la seguridad funcional (Soltanali et al., 2023), problema que requiere de una gestión técnica y administrativa, en función de reducir fallos totales del sistema (Chopra, 2022). La presencia de modos de fallos avanzados coloca al proceso en una condición muy desfavorable para garantizar resultados estables y confiables e implica un retorno a la Etapa I.

CONCLUSIONES

El procedimiento ofrece una perspectiva de enfoque de proceso en la mejora del desempeño de los equipos de la cadena de frío en la industria alimentaria, a partir de la jerarquía de los modos de fallos para gestionar su prevención, la evaluación de las pérdidas y el monitoreo, reflejando el impacto de la condición del equipo sobre la calidad del producto.

El factor de penalización, en la Función de pérdida de Taguchi y en la C_{pm}^* , es una valoración ponderada de los efectos de los modos de fallo al desviarse del objetivo. El estudio enmarcado en la industria alimentaria se considera una contribución metodológica alineada a las tendencias de Industria 4.0 y el mantenimiento predictivo.

Se requiere profundizar en el análisis que realizan los especialistas sobre efecto de los factores de riesgo (S_i , O_i , D_i) de los modos de fallos activos en la variabilidad y descentrado, con la propósito de lograr la definición de una expresión conceptual que formalice la relación de C_{pm}^* - Disponibilidad y establezca un umbral empírico como alerta temprana de pérdida de disponibilidad.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés en la publicación de este artículo.

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

A todos los especialistas y trabajadores de la industria involucrados en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Abdul Halim Lim, S., et al. (2015). Towards a conceptual roadmap for Statistical Process Control implementation in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.03.002>
- Almazah, M. M. A., Ali, F. A. M., Eltayeb, M. M., & Atta, A. (2021). Comparative Analysis Four Different Ways of Calculating Yield Index SSS pk Based on Information of Control Chart, and Six Sigma, to Measuring the Process Performance in Industries: Case Study in Aden's Oil Refinery, Yemen. *IEEE Access*, 9, 134005-134021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3113813>
- Alvarenga Cortéz, C. A., y Lebrón Flores, G. A. (2021). *Desarrollo de metodología "AMEF" (Análisis de modo y efecto de falla) Para sistemas de secundarios en una empresa del rubro farmacéutico*. [Tesis de Maestría, Universidad Don Bosco]. <https://hdl.handle.net/11715/2489>
- Arriaga-Lorenzo, P., Maldonado-Simán, E., Ramírez-Valverde, R., Martínez-Hernández, P. A., Tirado-González, D. N., y Saavedra-Jiménez, L. A. (2023). Evaluación de la cadena de frío en cortes de res vendida en supermercados. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(1), 21-30. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.02>
- Arslan, Ö., Karakurt, N., Cem, E., & Cebi, S. (2023). Risk analysis in the food cold chain using decomposed fuzzy set-based FMEA approach. *Sustainability*, 15(17), 13169. <https://doi.org/10.3390/su151713169>
- Aznar, B. J., y Guijarro, M. F. (2012). *Nuevos Métodos de Valoración. Modelos Multicriterio*. (2da Ed.). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://n9.cl/z8fs4>

- Bike, Z., & Ruichang, W. (2023). Construction of equipment evaluation index system of emergency medical rescue based on Delphi method and analytic hierarchy process. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(2), 101870. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101870>
- Chopra, G. (2022). Reliability modeling of a food industrial system with two types of repair persons wherein demand is season dependent. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(6), 918. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.6.057>
- Estupiñan Ricardo, J., Y, L. V. M., Marcia Coello, C. R., y Figuero Colín, S. E. (2021). Importancia de la preparación de los académicos en la implementación de la investigación científica. *Revista Conrado. Revista pedagógica de la Universidad de Cienfuegos*, 17(82), 337-343. <https://n9.cl/am2njt>
- Flores, M., Medina, D., Vargas, D., y Remache-Vinueza, B. (2020). Asignación de modelos de mantenimiento basada en la criticidad y disponibilidad del equipo. *CienciAmérica*, 9(4), 27-34. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i4.340>
- Gurralla, K. R., y Gonela, S. (2024). Multi-Criteria Decision Analysis to Assess the Efficacy of Cold Chain Technologies for Safeguarding the Quality of Temperature-Sensitive Products. *2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/DASA63652.2024.10836373>
- Gutierrez, J. N. M., Saldivar, D. O., Chumacero, S. M. Q., Cuadros, M. J. L., Curo, G. G., & Dumont, J. R. D. (2021). Estrategia de mejora de procesos Six Sigma aplicado a la industria textil. *Alpha Centauri*, 2(3), 72-90. <https://doi.org/10.47422/ac.v2i3.45>
- Hisham, Z. S. H., Ayamon, A., Fadzullah, N. L. A. M., Rusllim, N. A. M., Zohdi, M. A. M., Azhar, M. A. A. M., & Zainuddin, A. A. (2025). The Future of Food Security: The Role of Blockchain Technology in Global Aquaculture. *International Journal on Perceptive and Cognitive Computing*, 11(1), 103-113. <https://doi.org/10.31436/ijpcc.v11i1.540>
- Isaic-Maniu, A., Dragan, I.-M., Grigore, A.-M., & Constantin, F. (2023). Taguchi risk and process capability. *Risks*, 11(10), 178. <https://doi.org/10.3390/risks11100178>
- Lim, S. A. H., Priyono, A., & Mohamad, S. F. (2019). Introducing a Six Sigma Process Control Technique in a Food Production Line: Step-by-step Guideline and Critical Elements of the Implementation. *2019 IEEE 6th International Conference on*

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 338-342.
<https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8715119>

Luo, M., Zeng, S., Guo, J., & Chunbo, Y. (2014). Reliability Analysis Approach for Variation by Integrating FMEA with VMEA. *IEEE*, 525-529.
<https://doi.org/10.1109/PHM.2014.6988228>

Ortiz, A. M., y Soto, Y. C. (2021). Sistema haccp en el proceso de picadillo congelado de pescado en la empresa pesquera de cienfuegos. *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1), 78-102. <https://doi.org/10.24054/limentech.v19i1.3200>

Paladini, E. P., Avilés, B. G., Schumacher, L., Lorenz, M., y Urquiza, Y. R. (2019). Quality management model for perishable food in a fishing industry. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6), e13171. <http://doi.org/10.1111/jfpe.13171>

Quevedo, A., Vegas, S., Loda, J., Cedillo, G., & Vining, G. (2021). Within batch non-linear profile monitoring applied to shrimp farming: A case study. *Quality Engineering*, 33(2), 367-381. <https://doi.org/10.1080/08982112.2020.1844894>

Sharifi, F., Vahdatzad, M. A., Barghi, B., & Azadeh-Fard, N. (2022). Identifying and ranking risks using combined FMEA-TOPSIS method for new product development in the dairy industry and offering mitigation strategies: case study of Ramak Company. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(5), 2790-2807. <https://doi.org/10.1007/s13198-022-01672-8>

Shivangi Srivastava, Vinay Kumar Pandey, Adiba Fatima, Maske Sachin V, Sneha Pandey, Rahul Singh f., & Dhillon, B. (2024). A literature review on process intensification: An innovative and sustainable food processing method. *Applied Food Research*, 4 100363. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100363>

Soltanali, H., Khojastehpour, M., y Torres Farinha, J. (2023). An improved risk and reliability framework-based maintenance planning for food processing systems. *Quality Technology & Quantitative Management*, 20(2), 256-278. <https://doi.org/10.1080/16843703.2022.2093565>

Uribe, S. C., & Medina, N. F. S. (2022). Enfoque de riesgos en la gestión de la cadena de suministros en el sector industrial. *Ingeniería Industrial*, 279-296. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n.5812>

Bismayda Gómez-Avilés; Elianis Yanet Fleites-Álvarez; Dainier Rives-Catalá; Nila Marisol Plaza-Macías

- Wan, Q. (2020). Economic-statistical design of integrated model of VSI control chart and maintenance incorporating multiple dependent state sampling. *IEEE Access*, 8, 87609-87620. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993024>
- Wu, C. H. (2020). Modified processes capability assessment with dynamic mean shift. *Quality and Reliability Engineering International*, 36(4), 1258-1271. <https://doi.org/10.1002/qre.2628>
- Wu, J.-Y., & Hsiao, H.-I. (2021). Food quality and safety risk diagnosis in the food cold chain through failure mode and effect analysis. *Food control*, 120, 107501. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107501>

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).