



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Caso real: Parque Solar FV Canal del Dique Acuacar Cartagena Implementación Metodología Análisis de Repuestos Centrados en Confiabilidad y Riesgo RCS en Plantas de generación Fotovoltaicas en Colombia

Arif José Eslait Barrios, Msc A.A 3205 / Director Técnico Promisol / Arif.Eslait@promisol.co
Leidy Alejandra Urquijo / Profesional de Ingeniería y confiabilidad Promisol / Leidy.urquijo@promisol.co
Barranquilla, Colombia

Resumen

Este artículo presenta una metodología práctica para definir el stock óptimo de repuestos en plantas solares fotovoltaicas (SFV) con base en riesgo y confiabilidad. El enfoque integra análisis de modos y efectos de falla (AMEF), clasificación por criticidad y un modelo económico de decisión que compara el costo real de mantener inventario versus el riesgo económico de no tenerlo disponible. La propuesta se sustenta en experiencias de operación y mantenimiento (O&M) de Promisol S.A.S. en Colombia (72 MWp instalados en 252 plantas), y demuestra que una inversión focalizada en repuestos críticos (~834 MCOP) mitiga exposiciones de riesgo >1.000 MCOP derivadas de pocos escenarios de alto impacto. Se evidencian beneficios en disponibilidad, reducción de lucro cesante y cumplimiento contractual.

Palabras clave: Repuestos críticos, AMEF, RCS, riesgo, frecuencia, consecuencia, inventario, fotovoltaico, Colombia.

1. Introducción y contexto estratégico

La transición energética que atraviesa Colombia demanda que las organizaciones garanticen la **confiabilidad, disponibilidad y resiliencia operacional** de los activos asociados a la generación con fuentes renovables no convencionales. En este escenario, las plantas solares fotovoltaicas (SFV) se han consolidado como infraestructura crítica para asegurar el cumplimiento de metas de descarbonización,

continuidad del servicio y optimización del costo nivelado de energía. Sin embargo, la percepción común de que los sistemas solares poseen una **“confiabilidad intrínsecamente alta”** puede conducir a decisiones deficientes en materia de inventarios de repuestos, pero **alto impacto** en continuidad del negocio.

Promisol (Empresa del Grupo Promigas), en su rol como constructor, operador y mantenedor de infraestructura solar fotovoltaica, gestiona actualmente 72 MWp distribuidos en 252 plantas SFV, donde destacan:

- Parque Solar Canal del Dique Acuacar (10 MWp).
- Lamitech (2.3 MWp), la planta solar en techo más grande del país.
- 175 sucursales de Olímpica (27.2 MWp).
- 52 sucursales de Tiendas ARA (3.2 MWp).



Fig. 1 Parque Solar Canal del Dique 10 MWp.

La operación de esta infraestructura ha evidenciado que la **indisponibilidad de un**



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Asociación Colombiana
de Ingenieros

componente crítico, aun cuando su costo sea relativamente bajo, puede ocasionar pérdidas económicas significativas por **lucro cesante, penalidades contractuales, pérdida de energía no suministrada (ENS)** y afectaciones reputacionales. Estos riesgos se amplifican por:

- Tiempos de reposición prolongados.
- Dispersión geográfica de las plantas.
- Baja predictibilidad en la demanda de determinados repuestos.
- Ausencia de inventarios locales para componentes de alta criticidad.

Por ello, se requiere un modelo de gestión de repuestos críticos que incorpore explícitamente **riesgo, modos de falla, tiempos de aprovisionamiento, consecuencias económicas y disponibilidad requerida**.

En este contexto, el presente trabajo propone una **metodología integral para la toma de decisiones de inventario de repuestos**, articulando principios de:

- RCM (Reliability-Centered Maintenance)
- RCS (Reliability-Centered Spares)
- AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla)
- Gestión de riesgo
- Buenas prácticas del estándar NORSOK Z-008:2011
- SGA Sistema de gestión de activos

Este trabajo se fundamenta en **datos reales de operación y mantenimiento de Promisol**, y demuestra que una inversión direccionada en repuestos críticos —aproximadamente **834 MCOP**— permite mitigar exposiciones superiores a **1.000 MCOP** en eventos de alto impacto. El análisis evidencia que un enfoque sistemático basado en riesgo no solo mejora la disponibilidad de las plantas solares, sino que fortalece la

sostenibilidad económica del negocio y favorece el cumplimiento de los compromisos contractuales con los clientes.

2. Marco conceptual y metodología

propuesta: Toma de decisiones basada en riesgo

La metodología desarrollada en este estudio integra prácticas de **gestión del riesgo, RCS (Reliability-Centered Spares)** y AMEF, con el fin de establecer criterios cuantitativos y trazables para la definición del inventario óptimo de repuestos en plantas solares fotovoltaicas. Esta aproximación garantiza que las decisiones de inventario no dependan exclusivamente de la experiencia o de la rotación histórica, sino de un análisis técnico-económico basado en las consecuencias reales de la indisponibilidad de un componente.

El proceso metodológico se compone de cuatro elementos principales:

- **Preguntas guía del RCS**, como eje estructurante del análisis.
- **Jerarquización por criticidad**, basada en consecuencias, frecuencia de ocurrencia y tiempos de reposición.
- **Modelo económico de decisión**, que compara el costo real de mantener un repuesto versus el riesgo económico de no tenerlo disponible.
- **Evaluación cuantitativa del riesgo**, expresada como $\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$.

A continuación, se desarrolla cada componente de forma ampliada.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

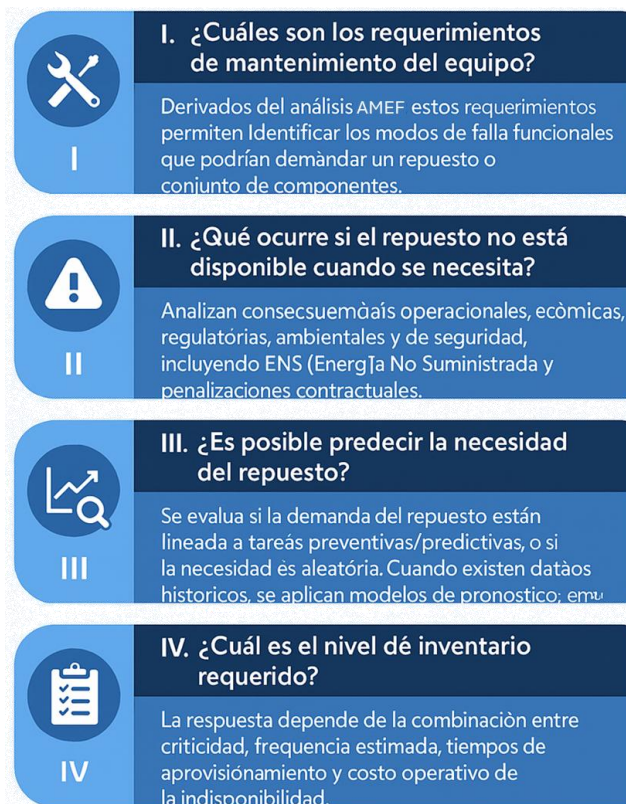
22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



2.1 Preguntas guía del RCS y articulación con AMEF

El proceso inicia con un conjunto de preguntas fundamentales del **Reliability-Centered Spares (RCS)**, cuyo propósito es proporcionar trazabilidad y sustentar técnicamente la decisión de mantener, no mantener o externalizar un repuesto:

- I. **¿Cuáles son los requerimientos de mantenimiento del equipo?**
Estos requerimientos permiten identificar los modos de falla funcionales que podrían demandar un repuesto o conjunto de componentes.
- II. **¿Qué ocurre si el repuesto no está disponible cuando se necesita?**
Se analizan las consecuencias operacionales, económicas, regulatorias, ambientales y de seguridad, incluyendo ENS (Energía No Suministrada), lucro cesante y penalizaciones contractuales.
- III. **¿Es posible predecir la necesidad del repuesto?**
Se evalúa si la demanda del repuesto es asociada a tareas preventivas/predictivas, o si la necesidad es aleatoria. Cuando existen datos históricos, se aplican modelos de pronóstico; en ausencia de ellos, se recurren a métodos basados en tasas de falla.
- IV. **¿Cuál es el nivel de inventario requerido?**
La respuesta depende de la combinación entre criticidad, frecuencia estimada, tiempos de aprovisionamiento y costo operativo de la indisponibilidad.



Estas preguntas se integran con un **AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla)**, que permite identificar modos de falla relevantes, evaluar su severidad e identificar componentes cuya indisponibilidad tiene mayor impacto. El AMEF orienta la priorización de repuestos y facilita la construcción de escenarios cuantitativos de riesgo.

2.2 Clasificación por criticidad del repuesto

Una vez identificados los modos de falla y sus efectos, los repuestos se clasifican según su **criticidad operacional**, considerando los siguientes criterios:

- **Consecuencia de la falla:** impacto técnico, económico, contractual, de seguridad, ambiental o reputacional.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



- **Frecuencia esperada de ocurrencia:** derivada de datos históricos, pronósticos estadísticos o tasas de falla.
- **Tiempo de aprovisionamiento (lead time):** incluyendo transporte, fabricación, importación y trámites aduaneros.
- **Disponibilidad de alternativas o redundancias:** componentes intercambiables, bypass, redundancia n+1, etc.
- **Requerimientos regulatorios o contractuales:** disponibilidad mínima, límites de ENS, penalidades.

- **Criticidad A:** Repuestos que deben mantenerse en planta o en inventario local. Fallas de alto impacto económico o de seguridad, y/o tiempos de reposición largos.
- **Criticidad B:** Repuestos localizados o centralizados; impacto relevante pero con alternativas de abastecimiento confiables.
- **Criticidad C:** Consumibles o repuestos de bajo riesgo, cuya demanda es predecible.
- **Criticidad D:** Ítems no críticos, recomendados para compra bajo demanda.

La clasificación se expresa típicamente en **cuatro niveles**:

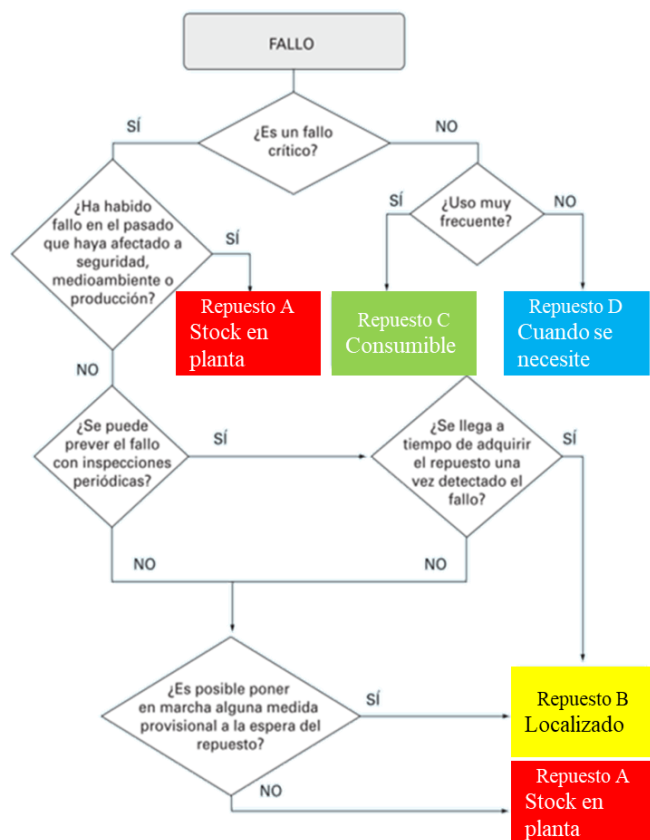


Fig. 2. Clasificación criticidad activos.

Esta jerarquización asegura que los recursos económicos se orienten a los repuestos que verdaderamente protegen la disponibilidad y estabilidad financiera de la operación solar fotovoltaica.

2.3 Modelo económico de decisión: costo de tener vs. costo de no tener

El eje económico de la metodología consiste en comparar el costo total de mantener un repuesto versus el riesgo económico asociado a no disponer de él en el momento requerido. La regla de decisión se expresa mediante la inequación:

$$\text{Costo de Tener (CT)} < \text{Costo de No Tener (CNT)}$$

Donde:

- $CT = FI \times CTP$
 - *FI*: factor de inventario que incluye costos de almacenamiento, capital inmovilizado, seguros y administración.
 - *CTP*: costo total del repuesto, incluyendo adquisición, importación y manipulación.
- $CNT = f \times LC \times t$



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



- f : frecuencia anual esperada de requerimiento (tasas de falla o demanda equivalente).
- LC : lucro cesante por día.
- t : tiempo total de abastecimiento (días).

La comparación permite determinar si un repuesto debe incluirse en inventario, mantenerse en stock del proveedor o comprarse bajo demanda. Esta relación introduce racionalidad económica y evita decisiones basadas únicamente en intuición o rotación histórica.

Cuando la demanda es **intermitente o poco frecuente**, se sugiere:

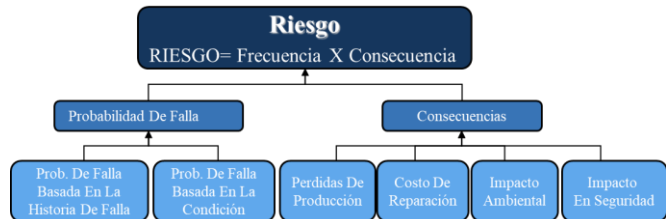
- Estimar f mediante tasas de falla,
- Aplicar modelos de demanda de bajo volumen

2.4 Evaluación cuantitativa del riesgo de inventarios

El principio fundamental adoptado en este estudio es la ecuación:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de falla (o Frecuencia)} \times \text{Consecuencia.}$$

Esta formulación permite traducir la percepción cualitativa del riesgo en una métrica cuantitativa comparable, facilitando decisiones objetivas sobre qué repuestos deben mantenerse en inventario, cuáles pueden adquirirse bajo demanda y cuáles requieren estrategias de abastecimiento alternativas. La incorporación de esta lógica hace posible priorizar repuestos cuyo costo económico directo es bajo, pero cuya falla puede generar **altas pérdidas por lucro cesante, penalidades contractuales o interrupciones prolongadas** debido a tiempos de reposición extensos.



En el contexto de **plantas solares fotovoltaicas**, donde la producción depende de la disponibilidad continua de inversores, transformadores, interruptores principales, sistemas de protección y componentes electrónicos sensibles— esta aproximación se vuelve especialmente relevante.

El análisis se complementa con un modelo de riesgo total anual:

$$RT(n) = Rtr(n) + Rnr(n)$$

- **Rtr(n)**: riesgo asociado a tener n repuestos, principalmente por capital inmovilizado y costos de almacenamiento.
- **Rnr(n)**: riesgo de no tenerlos.

Este enfoque permite visualizar el riesgo como una **balanza operativa** entre los impactos económicos del stock y los impactos económicos de la indisponibilidad.

De esta forma un repuesto de bajo costo puede tener **riesgo elevado** si el tiempo de reposición es prolongado y lucro cesante es alto.

El riesgo se representa en la herramienta visual como la **matrices RAM** corporativa, facilitando la toma de decisiones para la gerencia de mantenimiento y dirección técnica.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



		PERFIL DE RIESGO				
FRECUENCIA						
Muy alta	5	Bajo	Moderado	Alto	Extremo	Extremo
Alta	4	Bajo	Moderado	Alto	Alto	Extremo
Moderada	3	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Extremo
Baja	2	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
Muy baja	1	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
		1	2	3	4	5
		Inferior	Menor	Importante	Mayor	Superior
		IMPACTO				

Fig. 3. Matriz RAM de riesgo operativo. Representación gráfica de los resultados del análisis.

2.5 Valor agregado de esta metodología

La combinación de AMEF + RCS + modelo económico proporciona:

- Trazabilidad en las decisiones de inventario.
- Reducción efectiva de riesgo económico.
- Priorización objetiva de repuestos críticos.
- Mayor disponibilidad de las plantas solares.
- Justificación financiera de la inversión en repuestos.
- Cumplimiento de estándares internacionales de confiabilidad y gestión de activos.

3. Aplicación en plantas solares

fotovoltaicas de Promisol

La metodología desarrollada se aplicó a un conjunto representativo de activos pertenecientes al portafolio de plantas solares fotovoltaicas operadas por Promisol.

El análisis abarcó **12 unidades funcionales críticas de las 252 plantas SFV**, entre las cuales se incluyeron: inversores, módulos fotovoltaicos,

transformadores de potencia, interruptores principales, tableros de baja y media tensión, sistemas de protección, equipos de medición, cableado de continua y alterna, fusibles, conectores y componentes auxiliares asociados al balance de sistema.

Estas unidades son responsables de la conversión, control, protección y transferencia de energía hacia la red, y por tanto constituyen los elementos más sensibles en términos de disponibilidad y continuidad operativa.

A partir del inventario completo de componentes que integran estas unidades funcionales, se desarrollaron **637 escenarios de riesgo** correspondientes a posibles combinaciones de modo de falla–repuesto–consecuencia.

		PERFIL DE RIESGO				
FRECUENCIA						
Muy alta	5					
Alta	4		1			
Moderada	3	1	127			
Baja	2	503	4	8	4	
Muy baja	1	1				
		1	2	3	4	5
		Inferior	Menor	Importante	Mayor	Superior
		IMPACTO				

Para cada escenario se identificó:

- El modo de falla dominante (aislamiento, cortocircuito, degradación térmica, fallo electrónico, envejecimiento, arco eléctrico, corrosión, etc.).
- Su probabilidad o frecuencia de ocurrencia.
- El tiempo de reposición del repuesto (lead time).



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



- Las consecuencias económicas derivadas de la indisponibilidad del equipo.
- Los requerimientos de mantenimiento preventivo y correctivo asociados.
- La existencia de alternativas operativas o redundancias.

Este ejercicio permitió diferenciar entre **fallas de alta severidad, pero baja frecuencia**, típicas de transformadores e interruptores de media tensión, y **fallas frecuentes pero de bajo impacto**, como fusibles, conectores o ventiladores de inversores. La clasificación por criticidad reveló que los mayores riesgos económicos se concentran en un número reducido de componentes cuya falla genera pérdida inmediata de capacidad de generación y prolongados tiempos de reposición.

3.1 Identificación de eventos de alto impacto económico

El análisis evidenció varios escenarios donde la indisponibilidad del repuesto puede generar pérdidas superiores a cientos de millones de pesos, principalmente debido a:

- **Tiempos de reposición largos**, especialmente para transformadores, componentes de electrónica de potencia e interruptores de gran capacidad.
- **Limitada disponibilidad local de repuestos en Colombia**, en particular para equipos importados de marcas específicas.

	Perdidas por NO Generación	Costo Reparación	Diferencia	Pareto
Alto	\$ 527.150.912	\$196.496.800	\$(330.654.112)	15%
Alto	\$ 506.016.875	\$196.496.800	\$(309.520.075)	30%
Alto	\$ 425.121.703	\$126.850.000	\$(298.271.703)	42%
Alto	\$ 408.078.125	\$126.850.000	\$(281.228.125)	54%
Moderado	\$ 102.029.209	\$ 7.600.000	\$(94.429.209)	57%
Moderado	\$ 102.029.209	\$ 7.600.000	\$(94.429.209)	60%
Moderado	\$ 97.938.750	\$ 7.600.000	\$(90.338.750)	63%
Moderado	\$ 97.938.750	\$ 7.600.000	\$(90.338.750)	66%
Moderado	\$ 56.693.000	\$ 34.000.004	\$(22.692.996)	67%
Moderado	\$ 54.600.000	\$ 23.550.004	\$(31.049.996)	69%
Bajo	\$ 122.435.051	\$ 26.200.000	\$(96.235.051)	72%
Bajo	\$ 122.435.051	\$ 26.200.000	\$(96.235.051)	76%
Bajo	\$ 109.147.500	\$ 42.100.000	\$(67.047.500)	79%
Bajo	\$ 52.975.125	\$ 42.100.000	\$(10.875.125)	81%

Fig. 5 los 14 escenarios de mayor consecuencia económica y alto riesgo que representan el Pareto de pérdidas.

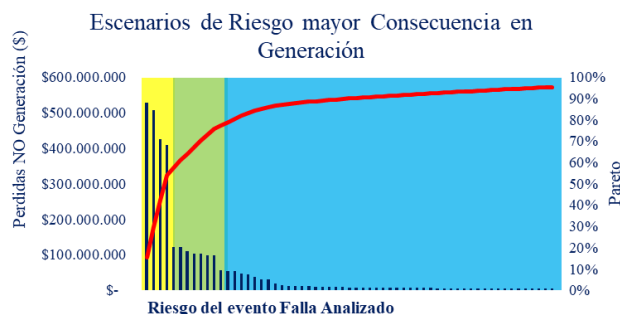


Fig. 4. Pareto de escenarios de mayor consecuencia económica y alto riesgo.

Costos por pérdida de generación Vs Mantener Stock Repuestos \$COP

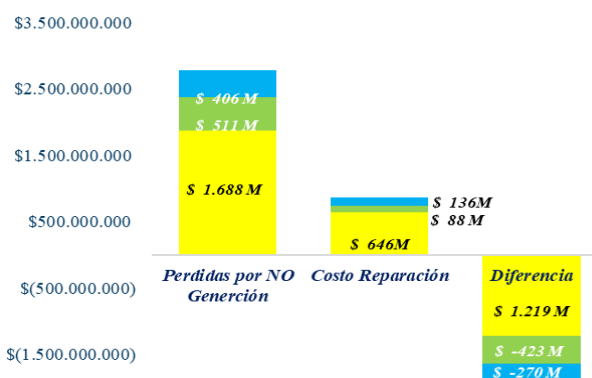


Fig. 6 Costos por pérdida de generación Vs mantener stock repuestos.

- **Alta dependencia del componente en la cadena energética del sistema.**
- **Interrupciones totales de la unidad** (inversor, transformador).



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



A continuación, se presentan escenarios de alto impacto seleccionados del análisis (valores en millones de COP):

Nivel de riesgo	Evento de falla	Impacto económico (MCOP)	Costo del repuesto (MCOP)	Retorno mitigación (×)
Alto	Cortocircuito con pérdida de aislamiento en transformador	528	291	1.8
Alto	Falla de aislamiento en interruptor principal 3.200 A (Canal del Dique ~5.3 MW)	425	66	6.4
Moderado	Falla de aislamiento en interruptor principal 2.000 A (Universidad Tecnológica de Bolívar)	56	30	1.9

Estos resultados muestran que la relación entre **costo del repuesto y costo de la indisponibilidad** puede superar fácilmente factores de $5\times$ o más, lo que valida la necesidad de mantener ciertos repuestos en inventario local, incluso cuando su nivel de rotación sea bajo.

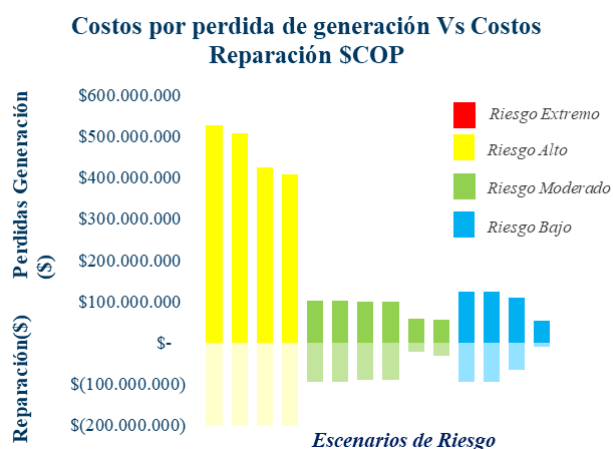


Fig. 7 Costos por pérdida de generación vs costos de reparación.

3.2 Priorización de repuestos críticos y no críticos

La combinación entre AMEF, clasificación por criticidad y modelación de riesgo permitió establecer un orden de prioridad para la inversión en inventarios. Entre los repuestos con mayor impacto en la disponibilidad del sistema se encuentran:

- Módulos y cadenas fotovoltaicas con pérdida total o parcial de capacidad.
- Tarjetas electrónicas, IGBT y ventiladores de inversores (componentes de desgaste acelerado).
- Transformadores, sensores, relés de protección y válvulas de alivio.
- Interruptores principales de media tensión.
- Fusibles, conectores MC4 y cables de CC/CA en trayectorias expuestas.

La priorización resultante se representó en una matriz de criticidad, clasificando los repuestos en cuatro categorías:

Criticidad de repuestos Plantas Solares Fotovoltaicas

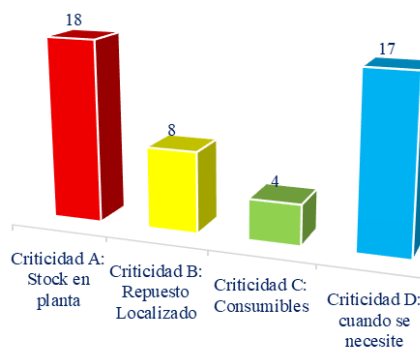


Fig. 8. Resultados criticidad de activos.

Como resultado, se identificación:

- 18 tipos de activos criticidad A (**stock en planta**)



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



- 8 tipos de activos criticidad **B (stock local centralizado)**
- 4 tipos de activos criticidad **C (consumibles)**
- 17 tipos de activos criticidad **D (compra bajo demanda)**.

Este proceso eliminó subjetividades y permitió visualizar de forma clara dónde debía concentrarse la inversión para lograr la mayor mitigación de riesgo.

Clasificación	Sistema	Componente
Criticidad A: <i>Stock en planta</i>	Inversor	Tarjetas electrónicas, IGBT
	Modulos Solares	Cable electrico DC
	Unidad de Transformación	Interruptores MT, TC's, TP's, Rele Buchholz, Accionamiento, PT(sobrepresión), Transf.
	Acometida eléctrica y Red Distribución	Reconector, Cajas primarias, Aislador
Criticidad B: <i>Repuesto Localizado</i>	Modulos Solares	Conectores MC4, Fusibles
	Unidad de Transformación	Interruptor Condensadores
	Acometida eléctrica y Red Distribución	Terminales Premoldeados, Fusibles, ramales
	Trackers	Sensor de posición
	Medidor Electronico	Medidor
Criticidad C: <i>Consumibles</i>	Unidad de Transformación	Interruptores BT
	Acometida eléctrica y Red Distribución	Cable Alimentación (fuerza)
	Medidor Electronico	TC, TP
Criticidad D: <i>cuando se necesite</i>	Inversor	Ventiladores
	Modulos Solares	Panel Solar
	Unidad de Transformación	Capacitores, Contactor
	Trackers	Actuador, Motor
	Sistema de monitoreo	Modulo Comunicación, RTU, Antena, Cableado
	Estación Meteorológica	Piranómetro, Sensor de Temperatura

Fig. 9. Detalle de componentes alineados a cada sistema de activos.

3.3 Validación con datos operacionales de Promisol

La aplicación práctica del modelo en parques solares como **Canal del Dique**, **Lamitech**, y diversas instalaciones comerciales, permitió contrastar los resultados teóricos con la realidad operacional. Se observaron:

- Fallas electrónicas esporádicas en inversores cuya reparación depende de componentes importados, con tiempos de entrega superiores a 20–45 días.
- Incidentes de aislamiento en transformadores que, aunque de muy baja frecuencia, pueden dejar fuera de operación bloques completos de generación.
- Fallas en interruptores principales que afectan totalmente la frontera comercial, con altos efectos en ENS y potenciales penalidades.
- Pérdidas de producción atribuibles a conectores, fusibles y cables degradados por condiciones ambientales tropicales (humedad, salinidad, radiación UV).

Cada uno de estos eventos permitió ajustar la frecuencia estimada (f), validar las consecuencias económicas y afinar la política de inventarios en función del riesgo real observado en campo.

3.4 Resultados preliminares del ejercicio aplicado

La aplicación de la metodología confirmó que:

- Un **grupo reducido de repuestos (menos del 10%) genera más del 80% del riesgo total**, por lo que la inversión debe estar focalizada.
- La política de stock basada en riesgo mejora significativamente la disponibilidad global de las plantas.
- La inversión recomendada para inventario crítico (~834 MCOP) mitiga más de 1.000 MCOP en exposiciones potenciales.

Esta evidencia valida la pertinencia del modelo para la toma de decisiones en el sector fotovoltaico y demuestra que su adopción constituye una



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



medida costo-efectiva para aumentar la confiabilidad operativa del portafolio solar de Promisol.

4. Resultados económicos y decisión de inventario

La aplicación del modelo RCS, complementado con AMEF y análisis cuantitativo del riesgo, permitió identificar los repuestos que generan mayor exposición económica ante una falla y determinar el nivel óptimo de inventario capaz de reducir dicha exposición de manera costo-efectiva. A partir del análisis de los **637 escenarios de riesgo** evaluados en las 12 unidades funcionales seleccionadas, se obtuvo una recomendación de inversión en inventario estratégico por un valor aproximado de **834 MCOP**, distribuido de acuerdo con la criticidad y el impacto operacional de cada componente.

Este monto representa una inversión focalizada, dirigida exclusivamente a los elementos cuya indisponibilidad produce consecuencias significativas en términos de **Energía No Suministrada (ENS)**, **lucro cesante**, **penalizaciones contractuales**, afectación de **KPIs de disponibilidad** y riesgos asociados al incumplimiento de acuerdos con clientes y operadores de red.

4.1 Distribución del inventario recomendado

El portafolio de repuestos crítico-estratégicos se distribuye en las siguientes categorías, en proporciones relativas a la base instalada de Promisol:

Tabla 1. Distribución inventario recomendado.

Repuesto	Costo Parcial	% Total Stock Critico	%Base Instalada
Inversores	\$ 290.606.763	45,3%	2%
Transformador Potencia	\$ 256.767.400	40,0%	21%
Trackers PSCD	\$ 53.223.125	8,3%	3,0%
Premoldeados	\$ 20.680.000	3,2%	1,5%
Paneles Solares	\$ 16.800.000	2,6%	0,20%
Fusibles y conectores	\$ 2.601.555	0,4%	1,5%
TC's, TP's, EQ. Medida	\$ 804.500	0,1%	1,5%
Terminales y Cables	\$ 554.000	0,1%	1,5%

- **Módulos fotovoltaicos:** 0,20% sobre la base instalada.
Aunque la probabilidad de falla severa en módulos es baja, la pérdida de cadenas completas o eventos de daño físico requerían disponibilidad inmediata para evitar indisponibilidad prolongada de los strings afectados.
- **Tarjetas electrónicas, IGBT, ventiladores y componentes internos de inversores:** ~2%.
Estos elementos presentan mayor frecuencia de falla debido a estrés térmico, envejecimiento electrónico y condiciones ambientales. Su reposición rápida es esencial para restablecer la capacidad de conversión de energía.
- **Componentes de la unidad de transformación:** ~21%.
Incluyen transformadores, sensores térmicos, relés de protección, válvulas de alivio e interruptores de media tensión. Su falla es menos frecuente, pero tiene consecuencias económicas extremadamente altas debido a la pérdida total de potencia en un bloque de generación.
- **Fusibles, conectores y cableado (CC y CA):** ~2%.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Aunque su costo es bajo, su falla puede generar incendios, pérdidas energéticas o indisponibilidades parciales; además, su fácil disponibilidad agiliza la respuesta operativa.

Costo Inventario Stock de Repuestos Críticos

Terminales y Cables	\$554.000
TC's, TP's, EQ. Medida	\$804.500
Fusibles y conectores	\$2.601.555
Paneles Solares	\$16.800.000
Premoldeados	\$20.680.000
Trackers PSCD	\$53.223.125
Transformador Potencia	\$256.767.400
Inversores	\$290.606.763

Fig. 10. Costos del inventario Stock crítico recomendado.

La priorización económica mostró que únicamente una fracción de los componentes del sistema fotovoltaico justifican inventario local, lo que confirma la efectividad de los métodos basados en riesgo frente a modelos tradicionales basados en rotación o intuición.

4.2 Resultados cuantitativos: mitigación del riesgo

El análisis demostró que la inversión recomendada de **834 MCOP** permite mitigar exposiciones superiores a **1.000 MCOP**, asociadas a eventos de alto impacto económico, especialmente aquellos relacionados con transformadores e interruptores de media tensión cuyo reemplazo tiene tiempos de entrega extensos (≥ 30 a 90 días).

La **relación costo-beneficio (Retorno de Mitigación)** es notablemente favorable en los casos más críticos:

- Transformador: 1.8×
- Interruptor principal 3.200 A: 6.4×
- Interruptor principal 2.000 A: 1.9×

Estos resultados evidencian que **cada peso invertido en inventario crítico devuelve entre 1.8 y 6.4 pesos en riesgo mitigado**, lo que constituye una decisión económicamente óptima y alineada con las mejores prácticas de gestión de activos.

4.3 Indicadores MRO y benchmarking

La evaluación se complementó con indicadores estándar de gestión de inventarios MRO (Maintenance, Repair and Operations), como:

- **Inventario MRO como porcentaje del RAV (Replacement Asset Value)**
- **Riesgo mitigado (COP)**
- **Disponibilidad operacional por planta**

Según referencias internacionales (SMRP y EN 15341), el **top quartile** para inventarios MRO suele estar entre **0.3% y 1.5% del RAV**, dependiendo de la madurez del sistema de mantenimiento y del contexto industrial. La inversión recomendada para Promisol se encuentra dentro de este rango de alta eficiencia, lo que confirma que:

- El inventario propuesto es **suficiente para asegurar disponibilidad**,
- No genera un sobre costo por capital inmovilizado,
- Optimiza el equilibrio entre **costo de tener** y **costo de no tener**.

5. Conclusiones

El análisis de inventarios de repuestos basado en confiabilidad y riesgo aplicado al portafolio solar fotovoltaico de Promisol demuestra que una gestión técnica estructurada permite optimizar la disponibilidad, reducir el riesgo financiero y mejorar la resiliencia operativa de las plantas de generación. La evidencia recopilada en los 637 escenarios evaluados confirma que los modelos



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



tradicionales de inventario, centrados únicamente en rotación o consumo histórico, resultan insuficientes para activos de baja frecuencia de falla pero alto impacto económico.

La metodología implementada, que integra **RCS, AMEF, modelación económica del riesgo y prácticas del estándar NORSOK Z-008**, se consolidó como un marco sólido para tomar decisiones objetivas sobre la tenencia, ubicación y nivel óptimo de repuestos. Esta aproximación permitió identificar con precisión aquellos componentes cuya indisponibilidad compromete la continuidad de la generación y expone a la compañía a pérdidas económicas significativas por Energía No Suministrada (ENS), lucro cesante y penalidades contractuales.

Los resultados demuestran que una inversión focalizada de aproximadamente **834 MCOP** en repuestos estratégicos mitiga exposiciones superiores a **1.000 MCOP**, obteniéndose retornos en mitigación entre **1.8×** y **6.4×** según el componente analizado. Esto valida que el inventario crítico debe ser entendido como un **mecanismo de aseguramiento operacional**, más que como un costo logístico, ya que su verdadero valor radica en evitar pérdidas derivadas de interrupciones prolongadas.

Asimismo, los hallazgos refuerzan que la **confiabilidad de la cadena de suministro** es tan importante como la confiabilidad técnica de los activos. Tiempos de reposición largos, dependencia de marcas específicas y restricciones logísticas en el contexto colombiano hacen indispensable contar con inventarios estratégicos localizados que garanticen continuidad operativa.

Finalmente, este estudio evidencia que la adopción de una política formal de inventarios basada en riesgo, complementada con indicadores MRO de clase mundial, análisis estadístico de demanda y

revisión periódica del portafolio de repuestos, constituye una herramienta clave para la gestión de activos solares en un entorno de transición energética. Implementar esta visión permite a Promisol fortalecer la disponibilidad de su infraestructura, mejorar su competitividad técnica y financiera, y operar bajo estándares de excelencia alineados con las mejores prácticas internacionales en confiabilidad y gestión de activos.

6. Referencias

Normas y estándares

- NORSOK Standard. (2011). Z-008: Criticality analysis for maintenance purposes (Ed. 3). Standards Norway.
- Sotuyo Blanco, S. (1997). Reliability-Centred Spares (Trad.). Information Science Consultants Ltd.
- RCS (Reliability-Centered Spares)
- AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla)
- ISO 31001 Sistemas de Gestión de riesgo
- Buenas prácticas del estándar NORSOK Z-008:2011
- ISO 55001 Sistema de gestión de activos

Artículos, informes y documentos técnicos

- Contreras, J., & Parra, C. (2020). PR-C&V: Priorización de repuestos por criticidad y valor económico. Documento técnico no publicado.
- Ortiz, D. (s. f.). Optimización de inventarios de repuestos. Asociación Colombiana de Ingenieros – Capítulo Cundinamarca. Presentación técnica.
- Promisol S.A.S. (2026). Modelo de evaluación de riesgos de repuestos [Material de trabajo interno]. Promisol.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Asociación Colombiana
de Ingenieros

Nombre Autor:

Arif José Eslait Barrios: Ingeniero Mecánico (1999). Magíster en Ingeniería Mecánica de la ***Universidad del Norte (2004)***. Analista de Vibraciones Categoría I, II del ***Vibration Institute (2007)***. ***Director técnico de Promisol. 24 años de experiencia en la industria petroquímica y Oil & Gas.*** Facilitador de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (***RCM***). Docente Cátedra Gestión de activos Universidad del Norte desde el año 2005, Barranquilla.

Leidy Alejandra Urquijo: Ingeniero Mecánico ***Universidad del Norte (2004)***. ***Profesional de Ingeniería y Confiabilidad Promisol. Nueve (9) años de experiencia en la industria petroquímica y Oil & Gas.*** Magíster en ingeniería de confiabilidad y gestión de activos de la ***Universidad Pontificia Bolivariana (2026)***. Facilitador de las metodologías de Mantenimiento y Confiabilidad *de activos*. *Auditor interno en norma ISO 55000.*