

PROPUESTA DE MODELO MATEMÁTICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CONFIABILIDAD OPTIMIZACIÓN COSTO RIESGO DE INVENTARIOS

Integrity Assessment Services
Maracaibo Estado Zulia Venezuela
Mayo 2013



Medina N. Robinson J. MSc. CMRP. Ingeniero Mecánico, con Especialización en Evaluación de Materiales e Inspección de Equipos en la Universidad Central de Venezuela, Diplomado en Confiabilidad de Sistemas Industriales en la Universidad Rafael Bellosio Chacín de Venezuela y Maestría en Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y profesional Certificado en Mantenimiento y Confiabilidad (CMRP) The Society for Maintenance & Reliability Professionals (SMRP). Con 21 años de experiencia en el área de Mantenimiento e Inspección de Equipos Estáticos asociados a instalaciones a nivel de la industria petrolera, nacional e internacional.

1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de los negocios, exige cada vez más a las industrias producir al más bajo costo, con la más alta calidad y un mayor nivel de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de sus equipos para poder cumplir con los exigentes requerimientos de mercado.



En el marco de este escenario tenemos el manejo de repuestos los cuales son de vital importancia en la continuidad operacional del proceso productivo. Sin embargo una política errada en el manejo de riesgo puede convertir esta área en una generadora de alto niveles de costos en el proceso productivo e impactar negativamente en la eficiencia de la gestión financiera.

El manejo de inventarios representa una inversión considerable de dinero que no generará retorno de inversión es decir este dinero invertido por las empresas en mantener un gran inventario de repuestos puede optimizarse y el excedente puede ser utilizados en nuevas inversiones que puedan generar beneficios a la empresa así como disminuir el impacto en impuestos que se paga por

mantener ese inventario, es por ello que se hace indispensable prestarle atención especial a este punto.

2. DEFINICIONES

Activo: Es un elemento tangible o intangible, capitalizable en un ciclo de vida establecido, que cumple una función en un proceso productivo y está sujeto a acciones de mantenimiento.

Confiabilidad: Es la probabilidad de que un activo cumpla una función específica (no falle) bajo condiciones de operación determinadas en un período de tiempo específico.

Análisis Costo Riesgo Beneficio (ACRB): Es una metodología que permite establecer una combinación óptima entre los costos de hacer una actividad y los logros o beneficios que la actividad genera, considerando el riesgo que involucra la realización o no de tal acción.

Confiabilidad Operacional: Es una filosofía de trabajo orientada en una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la productividad; además lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su

función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional.

Contexto Operacional: Es el conjunto de circunstancias que condicionan la operación de un equipo o sistema, están definidas como: localidad, ambiente, fluido de servicio, parámetros de operación, lineamientos ambientales, de seguridad y producción, calidad y disponibilidad de los insumos requeridos, configuración de trabajo, flexibilidad operacional, redundancia, alarmas, monitoreo de primera línea y otros.

Costos De Mantenimiento: Es la sumatoria en términos monetarios, de todos los recursos asociados a la gestión del activo durante toda su vida útil.

Criticidad: Es una medida del riesgo asociado a la falla de un activo, el cual se expresa como el producto de la frecuencia de ocurrencia de la falla o índice de probabilidad de falla y su consecuencia.

Datos De Equipo: Son los parámetros técnicos, operativos y ambientales que caracterizan el diseño y la utilización de una unidad de equipo.

Equipo: Es un elemento de producción dentro de un arreglo lógico funcional.

Equipo Natural De Trabajo (ENT): Es un equipo multidisciplinario constituido por especialistas o actores de diferentes disciplinas que tienen como objetivo guiar la implementación de estrategias de mantenimiento y confiabilidad, la sincronización de actividades, el establecimiento de planes integrales de acción y la optimización de los costos de producción y mantenimiento en la organización. Entre los actores o especialistas que pueden conformar el ENT se encuentran: custodios de instalaciones, planificador, programador, ejecutor, ente técnico, entre otros.

Especialista: Es el experto en áreas de conocimiento específico tales como: equipos dinámicos, equipos estáticos, control de corrosión, instrumentación, control, electricidad, confiabilidad y otros que apliquen al estudio.

Mantenedor: Es el especialista en reparación y mantenimiento de sistemas y equipos.

Mantenimiento: Es una combinación de todas las acciones técnicas y administrativas, que pretenden retener o restaurar un activo en un estado en el que pueda ejecutar una(s) función(es) requerida(s).

Mejoramiento Continuo: Es un ciclo de retroalimentación constante basado en planificación, ejecución, medición y control de actividades que permiten tomar acciones para la mejora de un proceso, incrementando la satisfacción de los clientes y de otras partes interesadas.

Almacén: Lugar o espacio físico para el almacenaje de bienes dentro de la cadena de suministro.

Riesgo: Efecto de la incertidumbre sobre la consecución de los objetivos, matemáticamente es el producto de la probabilidad de falla por sus consecuencias.

$$R(t) = Pf(t) \times C$$

R(t): riesgo

Pf(t): probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado

C: consecuencias de falla.

Impuestos: Clase de tributo (obligaciones generalmente pecuniarias en favor del acreedor tributario) regido por derecho público. Se caracteriza por no requerir una contraprestación directa o determinada por parte de la administración hacendaria (acreedor tributario).

Depreciación: El término depreciación se refiere, en el ámbito de la contabilidad y economía, a una reducción anual del valor de una propiedad, planta o repuesto.

Stock Mínimo: Es aquella cantidad de materias primas o materiales que necesita la línea de producción o la línea de servicio para satisfacer su demanda, mientras espera la llegada de los productos.

Stock de Seguridad: nivel de inventario establecido para evitar consecuencias a causa de la posible variación en la demanda que puedan superar el lote de repuestos disponibles.

Punto de Reorden: Puede definirse como el tiempo que transcurre entre la emisión de un pedido (orden de compra) por parte de un cliente y la recepción de las mercaderías solicitadas.

3. MODELO OPTIMIZACIÓN COSTO RIESGO INVENTARIO (OCRI)

La metodología de Optimización Costo-Riesgo Inventario (OCRI) representa una vía altamente efectiva y eficiente para ejecutar estudios en un tiempo relativamente rápido con resultados de gran impacto en la Confiabilidad Operacional del proceso. Las técnicas de OCRI nos ayudan a modelar y analizar distintos escenarios, con el fin de poder determinar el momento oportuno de realizar una actividad de mantenimiento, inspección, conocer la viabilidad económica de algún proyecto, determinar el número óptimo de repuestos o identificación del ciclo óptimo de vida útil. Estos resultados permitirán optimizar el proceso de toma de decisiones de los diferentes procesos de gestión de la Confiabilidad Operacional.

El objetivo final de cualquier modelo de inventarios es el de dar respuesta a preguntas como: ¿Qué cantidad de repuestos deben pedirse?, ¿Cuándo deben pedirse? Y ¿Cuál es el nivel de inventario de seguridad? La respuesta siempre la expresamos en términos de lo que llamamos cantidad de pedido. Esta representa la cantidad óptima que debe ordenarse cada vez que se haga un pedido y puede modificarse con el tiempo, dependiendo de la variación de

las consecuencias o impactos asociados a la ausencia de del repuesto analizado.

La respuesta a la segunda interrogante depende del tipo de sistema de inventarios. Si el sistema requiere revisión periódica en intervalos de tiempo iguales (por ejemplo, cada semana o cada mes), el tiempo para adquirir un nuevo pedido suele coincidir con el inicio de cada intervalo de tiempo. Por otra parte, si el sistema es del tipo de revisión continua, el nivel de inventario en el cual debe colocarse un nuevo pedido suele especificar un punto para un nuevo pedido.

En la Figura 2 se ilustra la variación de las cuatro componentes de costo del modelo de inventario general como función del lote de repuestos o nivel del stock de inventario. Para este modelo el nivel de stock de inventario óptimo corresponde aquel que asegura un costo total mínimo al sumar las cuatro componentes analizadas.

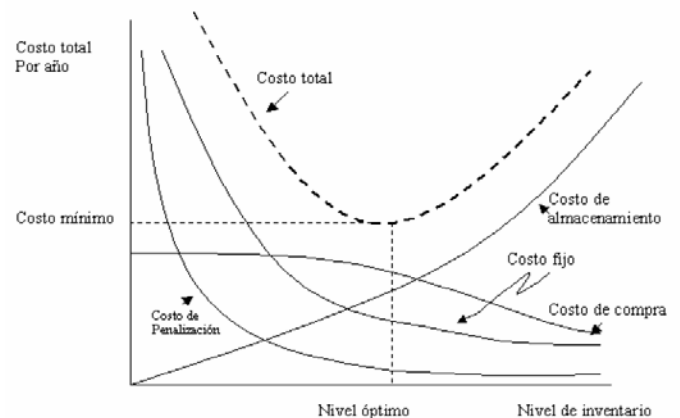


Figura 2: Modelo conceptual de la aplicación metodológica del OCRI

El costo de compra se vuelve un factor importante cuando el precio de la unidad de mercancía depende del tamaño del pedido. Esta situación se expresa normalmente en términos de un descuento por cantidad o una reducción de precio, donde el precio unitario del artículo disminuye con el incremento de la cantidad ordenada.

El costo fijo representa el gasto fijo (o no variable) en que se incurre cuando se hace un pedido. Por lo tanto, para satisfacer la demanda en un periodo, el pedido (más frecuente) de cantidades menores dará origen a un costo fijo mayor durante el período, que si se satisface la demanda haciendo pedidos mayores y por lo tanto, menos frecuentes.

El costo de mantenimiento, que representa los costos de almacenamiento de repuestos en almacén (por ejemplo, interés sobre capital invertido, almacenamiento, manejo, depreciación y mantenimiento del repuesto en almacén), normalmente aumenta con el nivel de inventario.

Costo de penalización o Riesgo, está definido en esta aplicación como las consecuencias asociadas por la indisponibilidad de repuestos para cubrir la demanda es decir la penalización por no tener el repuesto y será analizado como un egreso.

4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGIA OCRI

La metodología de estimación de niveles óptimos para inventarios de partes y repuestos tiene como objetivo principal estimar la demanda de repuestos con base a la frecuencia de falla de los equipos, los planes de mantenimiento, y el número de equipos que utilizan esta parte o repuesto. Adicionalmente considera las consecuencias de no tener el repuesto según los conocimientos de las logísticas con el suplidor y las probabilidades de reparación de repuesto así como la consideración necesaria de los costos de compra y almacenamiento.

En la Figura 3 se muestra el diagrama metodológico propuesto para la ejecución y aplicación de este tipo de estudios.

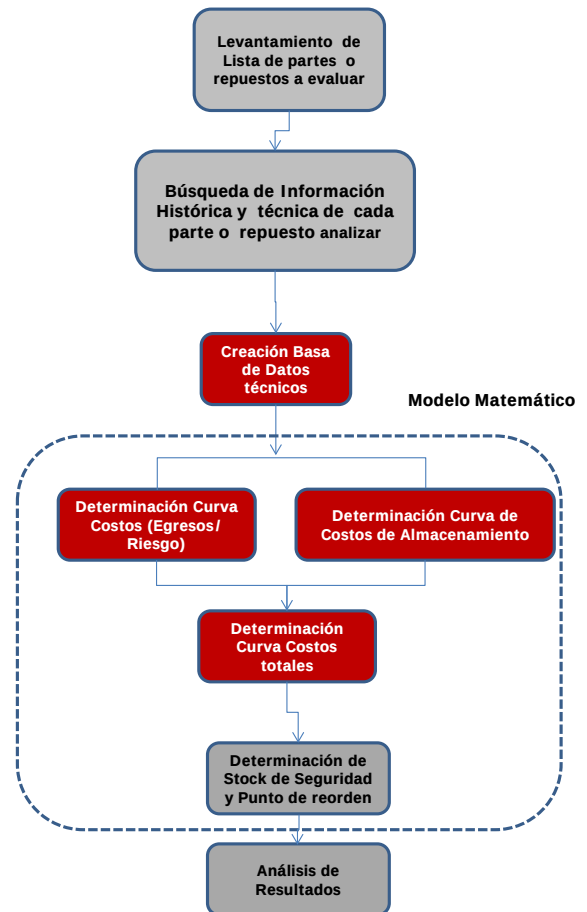


Figura 3: Diagrama metodológico para la ejecución de un OCRI

Según lo establecido en la Figura 3, se requiere el desarrollo de cinco etapas básicas para la aplicación metodológica del OCRI, las cuales se describen a continuación:

Etapas 1: Levantamiento de Lista repuestos a analizar.

Etapas 2: Búsqueda de Información histórica y técnica de cada repuesto a analizar

Etapas 3: Creación base de datos técnicos.

Etapas 4: Aplicación modelo matemático.

Etapas 5: Análisis de Resultados

Etapa 1: Levantamiento de Lista de Repuestos a Analizar

La identificación de los equipos modulares para el proceso de producción es fundamental para tener éxito en una gestión de repuestos basada en riesgo, de tal manera que este primer paso consiste en identificar ese universo de equipos cuya disponibilidad operativa compromete la disponibilidad de la instalación para cumplir con los compromisos de producción. Existen dos metodologías de confiabilidad que pueden ser utilizadas como primer filtro y son los Análisis de Criticidad y Análisis de Confiabilidad Disponibilidad/Mantenibilidad conocido también en inglés como Reliability, Availability and Maintainability (RAM).

En esta primera fase del estudio, debe generarse un listado preliminar de partes y repuestos que potencialmente serán los analizados. Los repuestos que aparecerán en esta lista obedecerán a los siguientes criterios técnicos:

- Partes y repuestos asociados a equipos críticos.
- Partes y repuestos de largos tiempo de entrega.
- Partes y repuestos con altos costos de compra y almacenamiento.
- Partes y repuestos de baja rotación, pero con altos costos de almacenamientos y pago de impuestos asociados.

Como segundo filtro se debe definir el nivel de importancia de cada repuesto, este segundo nivel de filtrado generará la lista definitiva de los repuestos que serán analizados, para esta jerarquización se plantea el uso del criterio de clasificación de importancia de cada repuesto conocido como criterio ABC.

El criterio ABC clasifica los productos según el porcentaje de inversión requerida por cada uno de los repuestos analizados, por lo que esta clasificación dividirá el stock de repuestos en tres grupos:

Grupo A: Porcentaje reducido de la cantidad de repuestos físicamente presentes en el total del stock de repuestos (10 al 20% aproximadamente) pero representan (80-90% aproximadamente) del costo total del dinero invertido en todo el inventario de repuestos.

Grupo B: Porcentaje medio en cuanto a unidades físicamente presentes en el universo de repuestos (alrededor del 30%) su valor respecto del costo total del inventario representa de 10 al 15%.

Grupo C: Este grupo de repuestos representa el más numeroso en cuanto a presencia en el almacén, son aproximadamente el 50 al 60% de los repuestos presentes físicamente, sin embargo representan entre un 10 a 15% del costos total del inventario.

En este momento se cuenta con el nivel de criticidad y el correspondiente porcentaje de inversión requerida para la adquisición de cada repuesto, ambos criterios deberán ser incorporados en la Matriz de clasificación propuesta en la Figura 4, para la cual se establecen los siguientes criterios que definirán el listado de repuestos finales que deberán ser analizados en el estudio de OCRI.

Criterio ABC / Criticidad	Baja	Media	Alta
Repuesto Tipo A	AB	AM	AA
Repuesto Tipo B	BB	BM	BA
Repuesto Tipo C	CB	CM	CA

Figura 4: Matriz de filtrado de equipos para el análisis de OCRI

Criterios:

- Repuestos pertenecientes a equipos de Media y Alta Criticidad cuya clasificación ABC sea Tipo A
- Repuestos pertenecientes a equipos de Media y Alta Criticidad cuya clasificación ABC sea Tipo B y cuyo valor de mercado sea mayor a: **XXX** USD (Este valor será establecido por el equipo natural de trabajo)

- El criterio de incorporar los Repuestos pertenecientes a equipos de Media y Alta Criticidad cuya clasificación ABC sea Tipo C, quedara a potestad del equipo natural de trabajo.
- Repuesto de baja Criticidad no serán tomados en cuenta para el estudio de OCRI a menos que el equipo natural de trabajo decida hacerlo.

Como conclusión de esta etapa todos aquellos equipos que coincidan con la zona verde establecida en la matriz, deberán ser analizados, mientras que la zona roja significa que no cumplen con el criterio para ser incorporados al estudio.

Etapas 2: Búsqueda de Información Histórica y Técnica de cada Repuesto a Analizar

El levantamiento de la información se debe efectuar mediante la revisión de las siguientes fuentes:

- Manuales Técnicos de Equipos.
- Despieces de equipos.
- SPIRS (Spear Parts and Interchanbility Records)
- Catálogo de repuestos.
- Boom of Materials.
- Consulta con fabricantes y proveedores de repuestos.
- Registros/Reportes de evidencia de movimientos, existencias y costos de materiales.
- Opinión de Expertos.
- Estudios de Jerarquización de Activos.
- Tiempos de Entrega.
- Tiempos de Reparación de los equipos.
- Frecuencias de falla y de mantenimiento (demanda del repuesto).
- Intercambiabilidad de partes y repuestos.
- Costos de Repuestos, mantenimiento, impacto económico por falla o indisponibilidad del repuestos, costos de almacenamiento y preservación.
- Niveles de inventarios actuales.
- Diagramas de tuberías e instrumentación.

Una vez obtenida toda la información técnica requerida se debe realizar un proceso de verificación y validación con los especialistas de la planta con la finalidad de depurar el listado de partes y repuestos planteado en la Etapa 1.

En esta etapa se contempla la revisión histórica del movimiento de repuestos por medio reuniones con los especialistas de cada disciplina (mecánica, electricidad, instrumentación), esto permitirá determinar los repuestos y/o partes asociadas a los equipos críticos, considerando como primer criterio de selección la experiencia que se tienen sobre cada uno de estos equipos. Así mismo en este proceso debe ser consultada la organización responsable de la compra de materiales, quienes poseen información clave en todo lo referente al proceso de compra,

Etapas 3: Creación Base de Datos Técnicos

Esta base de datos de partes y repuestos, será la base de almacenamiento y deposición de toda la información técnica e histórica de uso relacionada con cada uno de los repuestos a analizar y constituye el corazón de esta metodología. La información almacenada en esta base de datos será el insumo para alimentar el software y de donde el modelo matemático tomara las variables requeridas para poder efectuar los cálculos necesarios que la metodología exige, en este sentido se debe desarrollar una Base de Datos bien estructurada, con información confiable y estandarizada.

Durante la etapa de búsqueda de Información histórica y técnica debemos direccionar los esfuerzos a recolectar la información asociada a los campos establecidos en esta base de datos técnica, la cual está dividida en siete grandes áreas:

Área 1: Información General del Repuesto

Esta área corresponde a la descripción del repuesto la cual a su vez estará conformada por los siguientes campos:

- **Descripción del Repuesto:** Es la identificación escrita de la parte o repuesto, de acuerdo al criterio del fabricante o del usuario.
- **Código de Almacén:** Código o referencia que permite identificar el repuesto dentro de los almacenes, este código es único para cada parte o repuesto.
- **Fabricante del repuesto:** La empresa comercial que elabora la parte o repuesto.
- **Número de Parte:** Es el número de identificación que establece el fabricante de la parte o repuesto.
- **Intercambiabilidad:** En que otro equipo o equipos es usado el repuesto en evaluación, para así determinar el universo completo correspondiente al uso de cada ítem.

Área 2: Equipo Principal

Esta área corresponde a la segunda área general de la base de datos, en ella se obtendrá la descripción general del equipo principal al cual pertenece el repuesto, esta área está conformada por los siguientes campos:

- **TAG del Equipo:** Es un código de identificación del equipo en el cual se encuentra instalado el repuesto, es decir, todos los equipos donde se puede usar el repuesto.
- **Descripción Equipo:** Descripción o nombre del equipo en el cual se encuentra instalado el repuesto.

Área 3: Información de Repuestos Instalados

Esta área corresponde a la tercera área general de la base de datos, en ella se obtendrá información importante en cuanto al histórico de consumo o demanda así como

características operacionales y de diseño del proceso donde el repuesto opera. Esta área está conformada por los siguientes campos:

- **No. de Equipos Instalados:** Es la cantidad de equipos que usan el repuesto en total, considerando también aquellos equipos de respaldo.
- **No. de Repuestos por Equipo:** Cantidad de repuestos por equipo.
- **Cantidad de Repuestos Disponibles en Almacén:** Es la cantidad de repuestos correspondientes al ítem analizado disponibles en el almacén durante el análisis.
- **Horas Anuales de Operación del Equipo:** Corresponde al espacio de tiempo que el equipo opera en un año calendario.
- **Demanda Anual del Repuesto:** Se estima como la tasa de falla anualizada del equipo donde se encuentre instalado el repuesto, considerando solo las fallas relacionadas con la pérdida de función del repuesto en estudio, adicionalmente se debe incluir la demanda del repuesto por mantenimiento planificado. Otro aspecto importante en cuanto a la demanda es que la misma se requerirá sea distribuida bien sea definida por su comportamiento histórico o por opinión de expertos.
- **Desviación estándar Demanda Anual del Repuesto:** Corresponde a la desviación estándar de la distribución seleccionada para modelar la demanda probabilísticamente. (Este campo se calculará en función del tipo de distribución seleccionada).
- **Promedio Anual de utilización del repuesto:** Corresponde al promedio anual de partes o repuestos consumidos del ítem analizado.

Área 4: Información Costos del Repuesto.

Esta área corresponde a la cuarta área general de la base de datos, en ella se obtendrá información importante en cuanto al histórico de costos asociados al almacenamiento del repuesto, los campos que se contemplan son:

- **Costo del Repuesto:** Es el valor monetario del repuesto, de acuerdo al tabulador del fabricante o proveedor, expresado en unidades monetarias (USD). Esta variable debe ser considerada como una variable distribuida en el modelo matemático.
- **Costos de almacenamiento:** Todo material almacenado generará costos, a los cuales se denomina costos de existencias; los costos de existencias dependen de dos variables; la cantidad en existencias y tiempo de permanencia en almacén. Cuanto mayor es la cantidad y el tiempo de permanencia, mayores serán los costos de existencias. Este costo se asumirá como una variable distribuida que puede oscilar entre 6 y 10% del valor del repuesto.
- **Costos de Impuestos:** Representa los costos asociados a impuestos que la empresa debe pagar por el capital invertido en comprar y tener disponible el repuesto en almacén, Este costo se asumirá como una variable distribuida que puede oscilar entre 3 y 10% del valor del repuesto.
- **Costos de Depreciación del repuesto:** El término depreciación se refiere, en el ámbito de la contabilidad y economía, a una reducción anual del valor del repuesto. Este costo se asumirá como una variable distribuida que puede oscilar entre 3 y 10% del valor del repuesto.
- **Costos de obsolescencia del repuesto:** Este costo reviste gran importancia cuando se trata de artículos que pasan de moda con mucha facilidad. La competencia y el desarrollo tecnológico hacen que frecuentemente aparezcan en el mercado productos nuevos con ventajas adicionales en relación a los existentes en el mercado. Esto origina una devaluación por obsolescencia en cierto tipo de inventario. Este costo se asumirá como una variable distribuida que puede oscilar entre 3 y 10% del valor del repuesto.

- **Costos de Mantenimiento del repuesto:** Los costos de mantenimiento son los gastos en que se incurre al mantener inventarios, p. ej. Alquiler, electricidad. Este costo se asumirá como una variable distribuida que puede oscilar entre 2 y 5% del valor del repuesto.

Área 5: Análisis de Tiempos

Esta área corresponde a la quinta área general de la base de datos, en ella se obtendrá información importante en cuanto a los tiempos característicos de vida útil del repuesto, tiempos asociados al proceso de compra y entrega así como los tiempos de reparación del equipo por intercambio del repuesto afectado. Los campos que se contemplan son:

- **Vida Útil del Repuesto:** Indica el tiempo de vida útil del repuesto en almacenamiento (años).
- **Tiempos de Entrega:** Es el tiempo medido desde la puesta de la orden de requerimiento por parte del usuario del repuesto, más el tiempo de procura, tiempo de procesamiento del proveedor, tiempo de importación (nacionalización) y tiempo de entrega. Existen dos tiempos de entrega, tales como: Tiempo Normal de Entrega: Representa el tiempo de entrega del repuesto en condiciones normales por parte del fabricante o proveedor y el Tiempo de Entrega bajo Emergencia: Representa el tiempo mínimo de entrega del repuesto en condiciones de urgencia o emergencia debido a la falla del repuesto de manera imprevista y no se cuenta con su disponibilidad en el almacén del usuario.
- **Tiempo de Reparación del Equipo:** Tiempo efectivo para la reparación del equipo en donde se encuentra instalado la parte o repuesto; este tiempo se contabiliza desde que el equipo ha fallado hasta que el mismo entra en operación en condiciones normales después de reemplazar el repuesto

fallado, se debe incluir el tiempo de toda la logística y el efectivo de reparación.

Área 6: Análisis de Impactos y Consecuencias de No tener el repuesto

Esta área corresponde a la sexta área general de la base de datos, en ella se obtendrá información importante en cuanto a impactos económicos que tiene la ausencia del repuesto sobre los procesos medulares de la empresa y su entorno. Los campos que se contemplan son:

- **Impacto en producción:** Pérdida económica en el proceso de producción debido a la indisponibilidad del repuesto, Esta variable debe ser considerada como una variable distribuida en el modelo matemático. Otro aspecto importante a considerar es el impacto económico real por falla debido a la inexistencia de equipos de respaldo, en este sentido se deben representar todos los impactos económicos que puedan existir desde cero por la existencia de respaldo hasta el valor máximo que sería la no existencia de respaldo.
- **Impacto en Seguridad:** Pérdida económica que representa la indisponibilidad del repuesto por su impacto en la seguridad de las personas. Esta variable debe ser considerada como una variable distribuida en el modelo matemático.
- **Impacto Ambiental:** Pérdida económica que representa la indisponibilidad del repuesto por su impacto en el medio ambiente. Esta variable debe ser considerada como una variable distribuida en el modelo matemático.
- **Impacto en Mantenimiento Correctivo:** Costo económico que representa la reparación de emergencia del equipo. Esta variable debe ser considerada como una variable distribuida en el modelo matemático.

Área 7: Salidas del Modelo

El desarrollo del modelo matemático contempla la definición de ecuaciones que modelen las tres variables o salidas que el software tiene contemplado entregar, la cuales son: el Número Óptimo de Repuestos el Stock de Seguridad y Tiempo entre pedidos:

Etapas 4: Aplicación Modelo Matemático

La información proveniente de las fases anteriores se utilizará para construir la curva costo-riesgo de cada uno de los elementos analizados y obtener una estimación representativa del número óptimo de repuestos de baja rotación y los máximos y mínimos para los repuestos de alta rotación, considerando el riesgo asociado de la realización o no de una actividad de compra de una parte.

Esta etapa contempla la simulación de las variables recolectadas en la información de las fases anteriores en la herramienta computacional el cual además de representar los resultados por ítem a través del gráfico Costo – Riesgo, también calculará como resultado el número óptimo de partes idénticas que se deben tener en almacén para minimizar riesgos y optimizar los costos. Una vez obtenido los resultados, éstos deben ser comparados con la política de Inventario establecida por la empresa que implante la aplicación y con ello la implementación de los resultados obtenidos.

El modelo matemático contempla la definición de ecuaciones que modelen las tres variables o salidas que el software debe entregar, la cuales son:

- Número Óptimo de Repuestos
- Stock de Seguridad
- Tiempo entre pedidos

Modelo Matemático para el Cálculo del Número Óptimo de Repuestos:

La Cantidad Económica de Pedido (conocida en inglés como Economic Order Quantity o por las siglas EOQ), es el modelo fundamental

seleccionado para el control de inventarios el cual puede apreciarse en detalle en la Figura 5. Es un método que, tomando en cuenta la demanda de un producto (es decir, una demanda conocida y constante), el costo de mantener el inventario, y el costo de ordenar un pedido, produce como salida la cantidad óptima de unidades a pedir para minimizar costos por mantenimiento del producto, como complemento a este modelos se le añadirá el riesgo impacto económico (Riesgo) asociado a no contar con el repuesto una vez sea requerido.

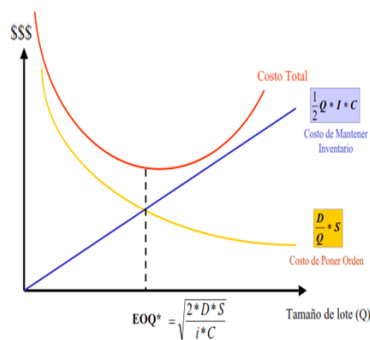


Figura 5: Modelo matemático del lote económico

Este modelo matemático contiene el desarrollo de las curvas que deben modelar el comportamiento de tres variables claves en este proceso en función de la variable lote económico de compra (**Q**), a continuación veamos en detalle el modelo matemático para cada una:

Curva del costo de mantener el Inventario:

Representa la curva asociada a la suma de todos aquellos costos involucrados en el proceso de almacenamiento de repuestos. La representación matemática para definir esta curva será establecida por la Ecuación 1.

$$CMI = 0.5 * Q * (CR + CA + CI + CD + CO + CM) \dots\dots\dots (Ec.1)$$

Dónde:

CMI: Costo de mantener el Inventario

Q: Lote de repuesto

CR: Costo del Repuesto

CA: Costo de Almacenamiento

CI: Costos de Impuestos por capital

CD: Costos por depreciación

CO: Costos de Obsolescencia

CM: Costos Mantenimiento Correctivo (reparación del equipo).

Curva de impacto económico o riesgo:

Representa la curva asociada a los egresos económicos de no contar con el repuesto una vez sea requerido por el sistema. Esta curva está conformada por dos grandes elementos o impactos económicos, el impacto administrativo de colocar la orden y el costo económico (riesgo) que representa no cubrir la demanda con el lote de repuesto almacenado (**Q**). La representación matemática para definir esta curva será establecida por la Ecuación 2.

$$R = \left[\frac{D}{Q} \right] \times CEO + [Pdemanda > Q] \times [IEP + IES + IEA + IERE] \quad (Ec.2)$$

Dónde:

R: Riesgo o Egreso económico

D: Demanda del repuesto

Q: Lote de repuesto

CEO: Costos de emitir la orden

Pdemanda: Probabilidad de que la demanda sea mayor que lote de repuesto (**Q**)

IEP: Impacto económico en Producción

IES: Impacto económico en seguridad

IEA: Impacto económico ambiental

IERE: Impacto económico en reparación del equipo.

Es importante resaltar que para el cálculo de la Probabilidad se requiere un proceso de caracterización de la variable "Demanda del

Repuesto” que permita obtener de manera exacta su comportamiento distribuido; este procedimiento puede ser uno de los dos que se detallan a continuación:

- El primer procedimiento consiste en construir la distribución de la Demanda del Repuesto, con la data histórica (en caso de estar disponible) del comportamiento de la misma por medio de alguna herramienta de caracterización probabilística, la cual permitirá obtener la distribución que mejor se ajuste al comportamiento de esta variable.
- El segundo procedimiento consiste en construir o caracterizar la distribución de la “Demanda del Repuesto” a través de la elicitación de la opinión de los expertos, extrayendo así del equipo natural de trabajo los valores máximos, mínimos y más probables de la demanda para cada tipo de repuesto analizado.

Curva de Impacto Total:

Representa la sumatoria punto a punto del costo total anualizado asociados a las curvas de mantener el Inventario de repuestos más la curva de impacto económico de no contar con el repuesto. El punto óptimo se obtendrá en esta curva en aquel valor donde la sumatoria de las curvas del Inventario de repuestos más la curva de impacto económico de no contar con el repuesto toma el menor valor, tal como se observa en la Figura 6.

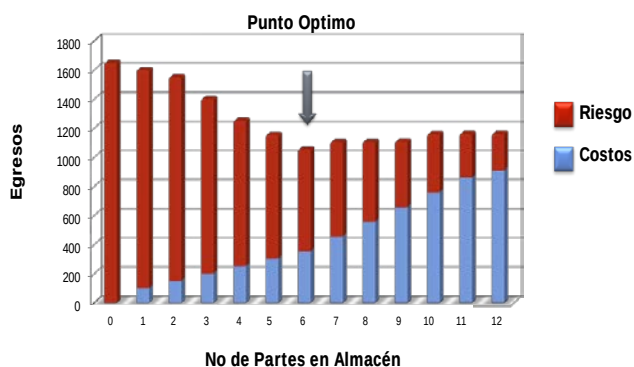


Figura 6: Curva de optimización Costo riesgo

Modelo matemático para el Stock de Seguridad:

El cálculo del stock de seguridad Corresponde al nivel de inventario establecido para evitar consecuencias a causa de la posible variación en la demanda que puedan superar el lote de repuestos disponibles. La representación matemática para definir el stock de seguridad será establecida por la Ecuación 3.

$$SS = Sm \times \frac{\text{Desviacion estandar de la demanda}}{\text{Tasa promedio de utilización mensual}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

SS: Stock de Seguridad

Sm: Stock Mínimo: Es aquella cantidad de repuestos que necesita la línea de producción para satisfacer su demanda. Este nivel mínimo supone el límite inferior de existencias del repuesto analizado. El stock mínimo tiene una íntima relación con el consumo de un repuesto en un tiempo determinado (# días, meses, años), y el tiempo de reposición que estimamos para la llegada del producto, con el uso de la ecuación 4 podemos obtener este importante valor.

$$Sm = C \times T \dots \dots (\text{Ec. 4})$$

Dónde:

Sm: Stock mínimo

C: Consumo del producto (Piezas/ (días, meses, año)

T: Tiempo de reposición (días, meses, año)

Modelo matemático para el Tiempo entre pedidos:

En cuanto al cálculo del punto de reorden o tiempo entre pedidos se establece en la ecuación 5:

$$T = \frac{\text{Tamaño del pedido}}{\text{Demanda del repuesto}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

T: Tiempo Óptimo entre Pedidos

Etapas 5: Análisis De Resultados

La documentación de los resultados y la validación de los mismos es parte esencial de esta fase, ya que permitirá al equipo natural de trabajo contraponer los resultados con la experiencia y percepción de cada uno de los entes involucrados en el proceso de producción a fin de darle una aprobación final y puesta en marcha a los resultados obtenidos.

5. BENEFICIOS

- Genera una base de datos capaz de integrar información técnica, de operación, instalación, adquisición, logística, mantenimiento y políticas de almacén de cada parte o repuesto necesaria para garantizar la operación de la empresa.
- Ajustar la cantidad de existencias de repuestos en almacén a la demanda, de forma que no se disponga de excedentes de mercancía que son una inversión y se corre el riesgo de su obsolescencia
- Establece la mejor estrategia de Inventarios considerando la metodología Costos Basado por actividad.
- Ajuste de los niveles de inventarios al contexto operacional, esto permitirá garantizar operaciones con menor riesgo de parada o falla de la planta por indisponibilidad del repuesto a la par de un negocio más rentable.
- Permite reducir altos costos incurridos por sobre estimación de inventarios.
- Permite reducir altos costos por almacenamiento y mantenimiento de partes

y repuestos al considerar los tiempos de obsolescencia.

- Mitiga riesgos de paro en la planta, por indisponibilidad de la parte o repuesto.
- Genera estrategias para la conformación de un Inventario “Seguro”.
- Permite conocer el número de partes que se debe tener en almacén, evitando asumir riesgos innecesarios y altos costos de almacenamiento.
- El diferenciar el inventario en artículos "A", "B" y "C" permite que la empresa determine el nivel y los tipos de procedimientos de control de inventario necesarios, por ejemplo a cuáles artículos aplicar una Optimización con base en Costo – Riesgo.
- El control de los artículos "A" del inventario debe ser muy intensivo por razón de la inversión considerable que se hace. A este tipo de artículos se les debe implementar las técnicas más sofisticadas de control de inventario.
- En los artículos "B" se pueden controlar utilizando técnicas menos sofisticadas pero eficientes en sus resultados.
- En los artículos "C" el control que se realiza es mínimo.

6. REFERENCIAS

- (1) Medina N. Robinson J. “Informe técnico, Especificación Técnica Optimización Costos Riesgo de Inventarios (OCRI). PDVSA, Venezuela 2013.
- (2) Fucci Tomas “Grafico ABC como técnica de gestión de inventarios. Junio 2000
- (3) Andra Callegaro. “Forecastin Methods for spare part demand. Universita degli Studi di Padova. 2010
- (4) Darko Louit. Optimization Models For critical spare parts inventories a reliability Aproach. Centro de Minería y Universidad católica de Chile. 2010.
- (5) Willen van Jaarsveld. Risk based stock decision for projects. Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam. 2008.

- (6) Dalbaen Freddy. Optimality and Risk
Modern trends in mathematical
Finance.Zurich 2009
- (7) PDVSA MM 01-01-01. Manual de
Mantenimiento. Definiciones de
Confiabilidad. 2005