

**MODELO PARA DETERMINAR POLITICAS DE INVENTARIO BASADO EN LOS
CONCEPTOS DE RIESGO Y CONFIABILIDAD DE EQUIPOS**

ING. ANIBAL JOSE GOMEZ MARQUEZ

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
2008**

**MODELO PARA DETERMINAR POLÍTICAS DE INVENTARIO BASADO EN LOS
CONCEPTOS DE RIESGO Y CONFIABILIDAD DE EQUIPOS**

ING. ANIBAL JOSE GOMEZ MARQUEZ

**Monografía presentada como requisito para optar al título de Magíster en
Ingeniería Industrial**

ASESOR: ING. MARCO SANJUAN, Ph. D

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
2008**

Aprobado por la División de postgrados e investigaciones en Ingeniería en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magíster en Ingeniería Industrial.

Director de la Investigación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Dedicatoria

En especial a Dios por brindarnos la oportunidad de vivir y de realizarnos como personas de bien.

A toda mi familia, por todo su apoyo y comprensión durante este período de mi vida y a la mujer con quién deseo construir una nueva familia: Paola.

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD DEL NORTE y a su grupo de profesores en especial al Ingeniero CARLOS PATERNINA por darme la oportunidad de pertenecer al Programa de MAESTRIA EN INGENIERIA INDUSTRIAL y al Ingeniero MARCO SANJUAN por sus invaluable aportes a esta investigación.

Al grupo humano de la Gerencia de Mantenimiento de MONOMEROS COLOMBO VENEZOLANOS S.A. por todo el apoyo y el acompañamiento brindado en este proyecto.

A todos mis compañeros y amigos de la MAESTRIA EN INGENIERIA INDUSTRIAL.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
1. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	19
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y MARCO REFERENCIAL.....	20
2.1 REVISION DEL ESTADO DEL ARTE.....	20
2.2 MARCO REFERENCIAL	27
2.2.1 DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA RCM	27
2.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGIA RCS.....	35
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	40
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL.....	40
3.2 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES.....	43
4. OPTIMIZACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN	45
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	45
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	49
4.2.1 PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA.....	49
4.2.2 MODELO PRINCIPAL.....	49
4.2.3 SUBMODELO PROVEEDORES DE REPUESTOS.....	54
4.2.4 SUBMODELO MANEJO DE BODEGA DE REPUESTOS	55
4.3 CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS.....	60

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS	73
ANEXOS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1: Diagrama del proceso industrial de producción de ácido nítrico.....	42
Figura No. 2: Diagrama del sistema antibombeo del compresor de aire.....	44
Figura No. 3: Esquema de la metodología utilizada en la investigación.....	48
Figura No. 4. Modelo principal del sistema compresor de aire – tanque de almacenamiento	51
Figura No. 5. Submodelo de llenado y succión.....	51
Figura No. 6. Submodelo de creación de fallas	52
Figura No. 7 Submodelo de proveedores de repuestos	54
Figura No. 8. Submodelo de manejo de la bodega de repuestos	55
Figura No. 9. Expresión para determinar el inventario inicial del repuesto	56
Figura No. 10. Expresión para regresar a los valores iniciales dados al modelo ...	56
Figura No. 11. Expresión para determinar la cantidad de unidades del repuesto que se ordenaron	57
Figura No. 12. Determinación del momento en que se requirieron las unidades del repuesto	58
Figura No. 13. Registro del tiempo en que permaneció almacenado el repuesto en la bodega de materiales	59
Figura No. 14. Inclusión del bloque decide	59
Figura No. 15. Costos totales de operación del sistema por unidades de repuesto en spare.	67
Figura No. 16. Costos totales de operación del sistema por unidades de repuesto en spare cuando la cantidad en spare varía entre 1 y 5.....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1. Cantidad de fallas por año del compresor.....	16
Tabla No. 2: Parámetros de funcionamiento del stock de repuestos según categorías.....	38
Tabla No. 3. Niveles de los factores en el diseño experimental.....	62
Tabla No. 4. Diseño del experimento para determinar el efecto de los factores A, B y C en el costo total de operación del sistema.....	62
Tabla No. 5. Resultados obtenidos en el modelo de simulación.....	63
Tabla No. 6. Estimación de los efectos de los factores cuando se mantiene una unidad en spare.....	64
Tabla No. 7. Estimación de los efectos de los factores y suma de cuadrados del diseño factorial.....	64
Tabla No. 8. Análisis de Varianza.....	65
Tabla No. 9. Costos estimados por mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 repuestos en spare, dado que se encuentra al menos una unidad del repuesto.	70
Tabla No. 10. Costos estimados por mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 repuestos en spare, dado que no se encuentra al menos una unidad del repuesto.....	70
Tabla No. 11. Estimación del riesgo anual por mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 repuestos en spare.....	71

LISTA DE ANEXOS

Anexo No. 1: Análisis de modos de falla y efectos del sistema antibombeo del compresor de aire.	74
Anexo No. 2: Historial de fallas del compresor de aire desde 1996 hasta el 2007.	74

LISTA DE SIMBOLOS

- λ : Tasa de fallas.
- Q_0 : Inventario inicial del repuesto en bodega de materiales. (2)
- D_0 : Demanda del repuesto en el momento en que se presenta una falla. (3)
- P_0 : Cantidad a pedir del repuesto [Cuando (2) > (3)]
- R_0 : Punto de reorden.
- U_H : Cantidad de producción de ácido nítrico.
- U_F : Cantidad de producción de fertilizantes.
- L_T : Nivel del tanque de ácido nítrico.
- σ_B : Capacidad de envío de ácido nítrico.
- σ_S : Capacidad de succión de ácido nítrico
- C_{rep} : Costo del repuesto.
- C_{alm} : Costo de almacenamiento.
- C_{np} : Costo de no producción.
- T_{alm} : Tiempo de almacenamiento del repuesto en la bodega.
- T_{mto} : Tiempo de ejecución de mantenimiento.
- LT : Tiempo de reabastecimiento del repuesto

RESUMEN

En este proyecto de investigación se presenta un modelo para el cálculo de las cantidades óptimas de inventario de repuestos a mantener en stock a partir del análisis de los modos de falla del equipo.

Dicho análisis de los modos de falla consiste en el cálculo de los tiempos operativos del equipo, la tipificación de los modos de falla y el ajuste de los datos a distribuciones estadísticas. Para demostrar la operacionalización del modelo, los parámetros que se utilizaron en la modelación fueron el tiempo de reabastecimiento de los repuestos, el costo de almacenamiento, y la distribución estadística de los tipos de modos de falla.

El modelo de simulación se desarrolló con ayuda del software ARENA® y una aplicación en Visual Basic de EXCEL®, en el cual se le incluyeron los parámetros mencionados.

Los resultados del modelo asocian la cantidad a mantener en inventario de un repuesto con el costo de cada una. Dicho costo se expresa como el producto de la probabilidad de tener o no el repuesto disponible con la consecuencia económica para la compañía. Es decir, el modelo involucra el concepto de riesgo para el cálculo del inventario óptimo y compara este cálculo con los métodos tradicionales para políticas de inventario.

Palabras clave: Modo de falla; confiabilidad; riesgo; tiempo de reabastecimiento; políticas de inventario.

1. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

El manejo de inventario de repuestos de bodegas de materiales ha pasado a ser uno de los indicadores de desempeño clave mas importantes dentro de la gestión de mantenimiento en las últimas tres décadas, debido a que una adecuada administración de este puede significar grandes ahorros para la compañía.

Un manejo incorrecto de este, además de incrementar los costos de la gestión de mantenimiento por mantener repuestos innecesarios en la bodega de los cuales no se tiene certeza alguna de su utilización, puede traducirse en no garantizar el nivel de servicio requerido ocasionando desabastecimiento e incurriendo en costos de no producción.

La función principal de un sistema de administración de inventarios de repuestos es garantizar el nivel de servicio requerido para ejecutar de manera oportuna los programas de mantenimiento de la organización, utilizando de forma eficiente los recursos asignados para tal fin.

Esta situación ha venido siendo analizada en industrias como la química, de refinación y de generación eléctrica, en las cuales, cuando uno de los equipos críticos que hacen parte de los procesos de producción, sale de servicio por una falla imprevista, se hace necesario disponer del repuesto para restablecer las condiciones iniciales del equipo en el menor tiempo posible. Esto obliga a las compañías a disponer de un sistema de administración de inventario de repuestos que garantice de alguna forma la disponibilidad de los repuestos cuando estos sean requeridos.

Lo anterior implica que una organización debe determinar cuales son las necesidades de un repuesto específico, basado en los planes de mantenimiento a corto, mediano y largo plazo que se tengan para el equipo al cual pertenece dicho repuesto. Esto hace necesario el cálculo de las políticas de inventario – léase, punto de pedido, cantidad a reabastecer y tipo de reabastecimiento – para las partes que comprenden un equipo en especial.

Ahora bien, existen diversos métodos para definir políticas de inventario para cada repuesto. Por ejemplo, el tamaño económico de lote, la planeación de requerimientos de materiales, el modelo justo a tiempo e incluso la investigación de operaciones, los cuales fueron los más utilizados durante la década de los 60 y 70. Algunos de estos modelos pueden ser utilizados y asociados con los planes de mantenimiento que tenga la compañía para un equipo o planta en especial. Por ejemplo, si se tiene certeza de que a un compresor se le realizará un mantenimiento cada 5000 horas, es posible modelar el reabastecimiento de los

repuestos a utilizar en dicha intervención a partir de la técnica justo a tiempo. Igual puede aplicar con las paradas de planta. Existe un riesgo asociado a este y está determinado por diversas variables que pueden generar ruido en el modelo, como por ejemplo el nivel de cumplimiento de los proveedores, el sitio de origen de estos, entre otros.

Sin embargo, para el tipo de industrias mencionadas, en donde se pueden presentar fallas imprevistas en los equipos y ocasionar paradas de planta, es conveniente profundizar este análisis y asociar las políticas de inventario de los repuestos con dichas fallas imprevistas presentadas. Los procesos industriales de hoy exigen mayor confiabilidad en los equipos y a un costo de mantenimiento mas bajo.

Este informe presenta el cálculo de las cantidades a mantener en inventario de un determinado repuesto con los modos de falla de un equipo y utilizando como criterio de decisión el concepto de riesgo. Dichos repuestos son los que utilizan para restablecer la condición inicial del equipo cuando se presenta una falla imprevista y los costos vienen dados por el del repuesto, el de almacenamiento y deterioro de este a lo largo del tiempo y el costo de no producción cuando no se dispone del repuesto en la bodega. El modelo presenta los costos de no mantener unidades de repuesto en la bodega y de mantener una o mas, a partir de los parámetros mencionados anteriormente.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La definición de políticas óptimas de inventario para los repuestos de equipos en las industrias químicas, de refinación, aeronáuticas o eléctricas se ha convertido en uno de los aspectos más importantes dentro de la gestión de mantenimiento.

Los métodos convencionales apoyados en softwares especializados en este tipo de cálculos ofrecen una aproximación a la definición de dichas políticas. Sin embargo, la exigencia de la industria y el proceso mismo hoy en día, de ofrecer cada vez mas mayores y mejores datos de confiabilidad y disponibilidad, hacen necesaria la vinculación de estos conceptos con el cálculo óptimo del inventario de repuestos de dichos equipos y plantas.

Esta vinculación se hace posible a partir del análisis de los modos de falla del equipo y teniendo en cuenta el concepto de riesgo, medido en términos económicos. Cabe resaltar, que este análisis determina la cantidad óptima de repuestos a mantener en inventario a partir del análisis de las fallas y no toma como base los mantenimientos programados que se le realicen a la planta o equipo, ya que para estos casos la modelación del inventario se puede trabajar con las técnicas descritas anteriormente.

El sistema seleccionado para demostrar el modelo desarrollado en esta investigación corresponde a un compresor de aire de una planta de ácido nítrico en una industria química y de fertilizantes. La selección de este equipo como sistema para analizar obedece a varias razones, una de las cuales – la más importante – se debe a que cuando este equipo sale de servicio por cualquier modo de falla, el impacto es tal que puede parar la producción del complejo industrial en su totalidad, después de un corto período de tiempo de ocurrencia de la falla.

Además de la criticidad de este equipo, el historial de fallas operacionales presentada por el equipo en los últimos 11 años ha sido bastante alto (ver tabla No. 1), limitando en un alto porcentaje la producción del complejo industrial.

Tabla No. 1. Cantidad de fallas por año del compresor

Cantidad de Fallas por año	
1996	3
1997	23
1998	21
1999	9
2000	17
2001	10
2002	9
2003	16
2004	4
2005	14
2006	33
2007	5

Por lo tanto, es necesario tipificar estos modos de falla, determinar las consecuencias de cada uno y definir las estrategias de mantenimiento mas adecuadas con el fin de prevenir la ocurrencia de alguna de estas fallas operacionales. Posteriormente, se deben asociar los repuestos que se necesitan para ejecutar tales programas de mantenimiento y optimizar el nivel de estos en la bodega de repuestos teniendo en cuenta el riesgo que implica no contar con estos durante una falla imprevista y compararlo con el costo de mantener cierta cantidad de estos en la bodega, dado que también tienen un alto costo unitario.

El compresor de aire de una planta de ácido nítrico en un complejo industrial se encarga de suministrar el aire requerido para la reacción de amoníaco con el fin de producir el ácido nítrico requerido para la producción de fertilizantes compuestos.

El ácido nítrico es enviado a un tanque de almacenamiento del cual se consume continuamente para la producción de fertilizantes de acuerdo a los compromisos comerciales de la organización.

Este equipo ha presentado 164 fallas operacionales durante los últimos 11 años representados en 204 días fuera de servicio en ese período de tiempo. Estos datos implican una disponibilidad baja (inferior al 95% sin incluir los mantenimientos programados) si se tiene en cuenta la criticidad que tiene este equipo dentro del complejo industrial, y una muy baja confiabilidad.

Esto hace necesario realizar un análisis de la confiabilidad del equipo y definir estrategias de mantenimiento que permitan incrementar su confiabilidad, basado

en programas de mantenimiento que minimicen el efecto de las consecuencias de las fallas operacionales.

Por otro lado, es necesario de igual forma minimizar el costo de los repuestos almacenados definiendo unas políticas de inventario óptimas para cada uno de estos repuestos, lo cual se logra mediante la asociación de las necesidades de estos repuestos con los modos de falla presentados por el equipo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Presentar un modelo que permita determinar la cantidad óptima a mantener en inventario de un repuesto teniendo en cuenta el tiempo operativo del equipo, los modos de falla y el tiempo de reposición del repuesto (lead time), basado en los conceptos de riesgo y confiabilidad de equipos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- I. Calcular los parámetros de tiempo de mantenimiento, tiempo entre fallas y tiempo operativo asociado a cada tipo de falla.
- II. Determinar el tipo de distribución estadística que se ajusta a los tipos de modos de falla que ha presentado el equipo.
- III. Desarrollar un modelo de simulación que permita definir las políticas de inventario óptimas para los repuestos que componen el compresor de aire de la planta de ácido nítrico.
- IV. Calcular los costos totales de operación de mantener n unidades del repuesto en inventario.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este informe se presentan los resultados obtenidos para el análisis de los modos de falla de un compresor de aire de una planta de producción de ácido nítrico con el fin de definir las políticas de inventario óptimas de los repuestos requeridos para restablecer las condiciones iniciales del equipo cuando se presenta una falla.

En el capítulo 2 se hace una revisión de la literatura existente relacionada con los temas de confiabilidad y manejo de inventarios en compresores de plantas industriales. En este capítulo se describen las investigaciones más recientes que están más relacionadas con los temas mencionados y se determina cual es su relación con la investigación presentada en este informe.

En el capítulo 3 se hace una descripción detallada del proceso de producción de ácido nítrico y como este se convierte en una las materias primas para la producción de fertilizantes dentro del complejo industrial. Este capítulo muestra en que parte del proceso está involucrado el compresor y cual es la importancia que tiene para la planta cuando este sale de servicio por una falla imprevista. De igual forma, se muestra un flujograma que permite ilustrar este proceso y se incluye una descripción de los componentes que conforman el equipo y la planta en general.

En el cuarto capítulo se presenta en forma detallada la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación. Aquí se describe paso a paso cada una de las tareas realizadas para cumplir con los objetivos propuestos y se incluye una descripción del modelo de simulación desarrollado, explicando el funcionamiento de este y los sub – modelos empleados. Finalmente, se incluye una caracterización de los parámetros empleados en el modelo y un análisis factorial 2^k para determinar robustez en el modelo y determinar correlaciones entre estos.

En el capítulo 5 se presenta el análisis de los resultados obtenidos con el modelo de simulación. Estos resultados incluyen la curva de confiabilidad y función de frecuencia de fallas del equipo, los costos por mantener 0, 1, 2,..., n unidades de repuesto de una parte del compresor en la bodega, y las políticas de inventario que minimizan este costo.

Finalmente, en el capítulo 6 se describen las conclusiones de la investigación realizada y las posibles futuras líneas de investigación en el tema.

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y MARCO REFERENCIAL

2.1 REVISION DEL ESTADO DEL ARTE

En la actualidad existen diversos métodos para estimar la cantidad que se debe mantener en la bodega de un determinado repuesto. En cada uno de estos métodos se tienen en cuenta diferentes variables y componentes que distinguen a uno de otro.

El control y la optimización del inventario de repuestos para mantenimiento de equipos han pasado a ocupar un lugar importante dentro de la gestión de este, debido principalmente a los grandes ahorros que allí se pueden dar.

Wei Li y Ming Zuo [1] en su artículo “Joint Optimization of Inventory Control and Maintenance Policy” afirman que los niveles de producción en los sistemas de manufactura dependen del estado del sistema de producción y están relacionados con las políticas de mantenimiento. En su investigación, Li y Zuo, miden el impacto del mantenimiento preventivo y correctivo en los niveles de producción y en el costo del inventario de productos. Según ellos, existen pocos estudios que tratan de la interacción entre estos dos temas y el efecto que la gestión de mantenimiento ejerce sobre los niveles de inventario de productos en las industrias.

Para esto, desarrollan un modelo de simulación que les permite encontrar el óptimo número de fallas y el óptimo inventario de seguridad que minimizan los costos de operación del sistema en su totalidad. Sus resultados muestran una estrategia de mantenimiento y políticas de control de la producción para reducir el costo de operación.

Dentro de la formulación del modelo se considera que las reparaciones realizadas a los equipos no son perfectas y que estos no retornan a su estado original después de cierto período de tiempo.

El modelo de Li y Zuo no tiene en cuenta el inventario de repuestos del equipo sino el de productos terminados y relaciona las políticas de mantenimiento con el control de la producción. Es decir, el problema de optimización, a pesar de estar en función de la variable costo de operación del sistema, no tiene en cuenta el inventario de repuestos del equipo, sino los niveles de producción de la industria y tiene en cuenta los mantenimientos preventivos que se le realizan al equipo con una frecuencia determinada.

En industrias como la química, de refinería o eléctrica, es necesario medir y monitorear continuamente la confiabilidad de los equipos, de tal forma que se puedan establecer modelos de predicción de fallas y anticiparse a estos con estrategias de mantenimiento que garanticen su disponibilidad mecánica objetivo e incrementen al mismo tiempo su confiabilidad y mantenibilidad. Para lograr esto es necesario establecer la distribución estadística de los modos de falla del equipo con base en el cálculo del Tiempo Operativo (TO) o Time To Failure (TTF).

En la mayoría de los casos, el principal parámetro para la medición de la confiabilidad es el tiempo medio entre falla (MTBF por sus siglas en inglés), lo cual es un concepto erróneo. William Wessels [2] afirma que el uso de las distribuciones exponencial y Weibull a partir del parámetro TO son las mas exactas y acertadas en las mediciones de la confiabilidad de los equipos.

En su artículo “Use of the Weibull versus Exponential to Model Part Reliability”, Wessels afirma que la Distribución de Weibull es mas práctica y exacta para modelar la confiabilidad de los equipos y realiza una evaluación comparativa con la exponencial para modelar la confiabilidad del motor de un vehículo a partir de los datos de TTF recopilados durante 20 años. Los resultados que obtuvo para la tasa de fallas y las curvas de confiabilidad variaron sustancialmente de una distribución a otra, a tal punto que para una distribución exponencial la tasa de fallas era constante y para la de Weibull esta disminuía con el paso del tiempo.

La distribución exponencial se comporta muy bien para el análisis de fallas de tipo electrónico y de partes digitales y es muy útil para modelar la confiabilidad de partes en spare. Adicionalmente, es de más fácil manejo y, a diferencia de la Weibull, no requiere de paquetes de software especializados para su análisis.

Sin embargo, se han desarrollado aplicaciones para solucionar este problema como por ejemplo ARINC y Relex. Estos algoritmos utilizan modelos de simulación para evaluar estadísticamente los límites de confianza para los valores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

La optimización de partes en spare, recursos y reparaciones es un problema complejo, como lo afirma A. Dubi [3] en su investigación, titulada “The Monte Carlo Method and Optimization of Spare Parts in Complex Realistic Scenarios”.

Dubi propone una metodología que primero, calcula el desempeño general del sistema y luego, utiliza la simulación de Monte Carlo como la herramienta principal para optimizar el costo de los recursos. Este modelo supone que todas las fallas que se presentan se distribuyen exponencialmente, con una tasa de fallas constante y que los componentes son independientes el uno del otro.

Este modelo propone una función de minimización del costo de las partes en spare a partir del producto del costo unitario de cada spare por la cantidad a mantener en inventario.

El método, sin embargo, involucra un gran número de cálculos computacionales. Por ejemplo, si se tienen n componentes en el sistema y k partes en spare, se deben realizar $n \times k$ cálculos, lo cual hace restrictivo el modelo de alguna forma.

La otra diferencia con el modelo propuesto en esta investigación radica en la independencia de los componentes del sistema: mientras el modelo de Dubi, considera que los componentes en el sistema no tienen efecto o influencia uno en otro, el modelo propuesto presenta un análisis factorial 2^k , con $k = 3$, que mide el efecto de los componentes del sistema en la variable de respuesta.

Los modelos para optimizar el inventario de repuestos en spare han evolucionado en los últimos años de forma paralela a la evolución en la concepción de la gestión de mantenimiento. Esto, como consecuencia de la concientización de la gran cantidad de dinero que representa para las industrias el capital inmovilizado por concepto de repuestos que tienen poca rotación y un alto costo unitario, debido a que teóricamente deben mantenerse en spare por la criticidad que estos tienen. Sin embargo, debido al alto costo unitario que presenta este tipo de repuestos y al impacto que podrían causar a las compañías en caso de no disponer de estos, se hace importante considerar la relación entre la confiabilidad de los equipos y la disposición de los repuestos en spare en la bodega.

Es por esto, que algunos modelos actuales tratan acerca de esta consideración. Jodejko, Anna [4], presenta un modelo para determinar el nivel crítico de inventario y su impacto en la disponibilidad de los equipos. Además, permite una aproximación para el cálculo de la probabilidad de que el sistema o equipo salga de servicio y la probabilidad de su disponibilidad basado en las consecuencias.

En su artículo, titulado “Model Of System Availability Caused by Spare Parts Inventory Level”, Jodejko afirma que existen expresiones y modelos para determinar la cantidad de partes en spare de acuerdo a los requerimientos especificados. Sin embargo, cuando el sistema o equipo sale de servicio y genera consecuencias que se consideran severas, se hace necesario proveer de un modelo para garantizar los objetivos de producción en el largo plazo. Y, de otra parte, no es económicamente efectivo mantener grandes cantidades de repuestos en spare, ya que en algunos casos puede ser más costoso que los propios beneficios de la compañía traducidos al contexto del sistema. Por esta razón, el inventario de repuestos debe ser planeado apropiadamente.

El modelo de Jodejko presenta algunas variaciones con relación al modelo planteado en este proyecto de investigación:

En primer lugar, asume que el momento en que se recibe el repuesto en la bodega es completamente aleatorio. Es decir, no es un parámetro ni tampoco se asume que sigue una distribución estadística. En el modelo propuesto este dato se asume como un parámetro.

En segundo lugar, el modelo de Jodejko asume que al inicio de período ($t = 0$), la cantidad de spares baja hasta el nivel crítico y se inicia un nuevo ciclo. En el modelo propuesto, la cantidad en spare al inicio se asume que es cero, y luego se varía hasta cinco o más.

Los resultados de este modelo demuestran que cuando se incrementa el nivel de inventario de un repuesto de un equipo o sistema de producción genera un incremento en la disponibilidad del sistema. Obviamente, que a un mayor costo por concepto de la disponibilidad de los repuestos. Esto es válido únicamente cuando el mismo repuesto se encuentra instalado en varios equipos.

Wang y Zeng [5], por su parte consideran que el control del inventarios de partes en spare juega un papel muy importante en la gestión de las operaciones en la actualidad y analizan el problema de mantener o no unidades de repuesto en inventario. Afirman que la criticidad de un repuesto, cualquiera que este sea, es un factor muy importante que está asociado con el nivel de servicio y la probabilidad de no disponer de este cuando sea requerido. Por lo tanto, los parámetros de control para el manejo del inventario deben estar acorde con las restricciones y factores como el costo, la disponibilidad, consideraciones de almacenamiento, probabilidad de requerimiento del repuesto y costos de no producción.

En su investigación, "The Criticality of Spare Parts Evaluating Model Using Artificial Neural Network Approach", Wang y Zeng, utilizan algoritmos genéticos para estimar la clasificación de cada repuesto a utilizar basados en los parámetros mencionados y realizan una comparación entre diferentes métodos.

En su modelo, consideran que la mejor forma para administrar el inventario de repuestos en spare es identificar la criticidad de cada uno (alta, media o baja) y asociarlo con las necesidades de las operaciones de mantenimiento.

Esta investigación fue realizada en una planta nuclear en China y los parámetros que se utilizaron fueron: predicción de la falla, tiempo de reabastecimiento del repuesto, disponibilidad del repuesto y especialidad de este (estándar o no estándar).

Los resultados obtenidos indican que el modelo de redes neuronales tiene una alta exactitud de predicción y aceptabilidad. Sin embargo, este modelo tiene algunas desventajas; por ejemplo, el número de variables de entrada del modelo es limitado, por lo tanto no puede ser utilizado completamente a nivel industrial.

Pese a la diversidad de modelos presentados hasta ahora, la mayoría de ellos presenta restricciones similares en cuanto a su aplicabilidad a la industria, ya que en algunos casos, dependiendo del modelo o la técnica utilizada, involucran una gran complejidad computacional, limitando de esta forma su utilización.

Chelbi y Rezg [6], plantean un modelo en el que las fallas que se presentan son aleatorias y no están sujetas a una distribución estadística. La unidad de producción es sometida a una acción de mantenimiento tan pronto se llega a un período T , o cuando se presenta la falla. En cualquiera de los dos casos, se da lo que ocurra primero.

El modelo considera, por lo tanto, tanto las fallas aleatorias que se presenten como los mantenimientos preventivos que se ejecutan con una frecuencia determinada y la variable a minimizar es el costo total promedio de operación.

Sin embargo, una diferencia con los modelos hasta ahora planteados, es que se cuenta con un inventario en stock del repuesto que es mayor a cero. Es decir, utiliza el concepto de inventario de seguridad.

Además, de plantear el costo total promedio como la función objetivo, el modelo tiene en cuenta un mínimo valor de disponibilidad de la unidad de producción.

Teniendo en cuenta el planteamiento y la consideración de los mantenimientos preventivos que utiliza el modelo, la optimización del inventario está basada en el modelo Justo a Tiempo, y se limita a determinar el tamaño del inventario o "buffer".

El artículo, titulado "Analysis of a Production / inventory system with randomly mailing production unit subjected to a minimum required availability level", tiene como objetivo de estudio determinar el tamaño del "buffer" y del tiempo T , que minimicen el costo total promedio de operación de la unidad de producción y satisfagan el mínimo nivel de disponibilidad requerido.

El modelo planteado difiere del propuesto en esta investigación en varios aspectos: en primer lugar, el modelo de Chelbi propone una distribución de probabilidad de la duración del mantenimiento ejecutado, mientras que el modelo propuesto asume tiempos reales de ejecución de mantenimiento dados por el tiempo en que el equipo estuvo fuera de servicio. En segundo lugar, el modelo de Chelbi asume que los repuestos no pierden valor con el tiempo., mientras que el modelo propuesto asume que el costo de almacenamiento aumenta a medida que el tiempo transcurre.

Por otra parte, Chelbi, al igual que el modelo propuesto, considera que las fallas se detectan instantáneamente y que la calidad de los trabajos de mantenimiento ejecutados es tan buena que restaura el equipo a sus condiciones normales de

operación perfectamente. Estas, se constituyen en similitudes entre los dos modelos.

Los resultados obtenidos en el modelo de Chelbi, muestran que el tamaño del “buffer” es generalmente sensible a una variación en los costos de inventario y de mantenimiento, mientras que el valor óptimo para la edad del equipo a la cual se debe ejecutar el mantenimiento preventivo está limitado por la restricción del mínimo nivel de disponibilidad requerido.

Ghodrati, Akersten y Kumar [7], investigaron los riesgos asociados en la estimación de la cantidad de partes en spare debidos a la no consideración de las características del sistema operativo y el ambiente que se esté analizando. Estas características pueden ser, por ejemplo, temperatura, humedad, las habilidades de los operadores de planta, entre otras.

En su artículo “Spare Parts Estimation and Risk Assessment conducted at Chogart Iron Mine: A Case of Study”, afirman que las necesidades de partes en spare son dependientes de las características del producto en cuestión, su confiabilidad y mantenibilidad y de las características del ambiente en el cual el producto está siendo tratado. Dichas características y las covarianzas tienen una influencia significativa en la confiabilidad del sistema y por ende, en la cantidad de partes en spare.

La metodología utilizada en este artículo se basa en el diseño de un árbol de eventos que identifica y cuantifica posibles características de salida por medio de un análisis de riesgo en la planeación de partes en spare.

Según sus autores, la aplicabilidad de esta investigación está en la industria y en la ayuda que puede significar al momento de tomar decisiones que requieran cierta exactitud y una gran aproximación para soportar el cálculo de partes en spare.

Sin embargo, en algunos casos puede resultar confuso identificar las características propias de cada proceso y cuantificarlas. Por lo tanto, desde el mismo planteamiento del modelo puede existir un sesgo influenciado por el encargado de modelar el problema.

Shibaji Panda [8], desarrolló un modelo para determinar el inventario de seguridad óptimo basado en la metodología JIT, con buffer y basado en una mínima cantidad de reparaciones y una frecuencia de mantenimiento preventivo.

Su artículo, titulado “Optimal JIT Safety Stock and Buffer Inventory For Minimal Repair and Regular Preventive Maintenance”, Panda propone una estrategia de mantenimiento preventivo para una estructura de producción JIT para minimizar el costo del sistema. Dentro de las consideraciones del modelo está el hecho de

contemplar solo dos estados después de una reparación: bueno o malo. El sistema, además, reduce su efectividad después de cierto tiempo.

Por otra parte, las fallas que se presentan son aleatorias y para evitar la escasez de repuestos durante las reparaciones, se maneja un inventario de seguridad y buffers antes y después de dicha reparación. El modelo, al final, determina el valor de inventario de seguridad, del buffer y de los ciclos de producción para un mínimo costo.

Sin embargo, en el modelo propuesto en esta investigación se trata de determinar la cantidad de partes en spare, que al final representa un inventario de seguridad que garantice la disponibilidad del repuesto cuando se presente una falla (no aleatoria sino con base en una distribución estadística de los modos de falla).

Tapas K. Das [9], por su parte, desarrolló un modelo para maximizar la producción de partes teniendo en cuenta los mantenimientos preventivos que se realicen a los equipos que se utilizan en dicha producción.

En su artículo titulado “Optimal Preventive Maintenance in a Production Inventory System”, Tapas considera que la demanda de productos, el tiempo de producción, el tiempo operativo, el tiempo de ejecución del mantenimiento preventivo y el tiempo de reparaciones siguen unas distribuciones estadísticas con parámetros definidos. Además, considera que se mantienen buffers de inventario.

A pesar de ser una investigación enfocada a la producción (por su función objetivo), el modelo desarrollado por Tapas involucra los conceptos de disponibilidad de los equipos que intervienen en dicha producción, sin embargo, precisamente por su enfoque no tipifica las fallas y, en consecuencia, no optimiza la cantidad de partes en Spare.

Este modelo puede ser considerado en aquellas industrias en las cuales los costos de mantenimiento preventivo y correctivo sean altos en comparación con los costos de producción y a la organización le interese maximizar el beneficio obtenido por la producción de cada unidad de producción.

2.2 MARCO REFERENCIAL

2.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGIA RCM

- **Generalidades.**

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM es una metodología de análisis sistemático, objetivo y documentado, que puede ser aplicado a cualquier tipo de instalación industrial y útil para el desarrollo u optimización de un plan eficiente de mantenimiento.

Desarrollada por United Airlines en Estados Unidos, el RCM analiza cada sistema y cómo puede fallar funcionalmente. Los efectos de cada falla son analizados y clasificados de acuerdo al impacto en la seguridad, operación y costo. Estas fallas son estimadas para tener un impacto significativo en la revisión posterior, para la determinación de las raíces de las causas.

La idea central del RCM es que los esfuerzos de mantenimiento deben ser dirigidos a mantener la función que realizan los equipos más que los equipos mismos. Es la función desempeñada por una máquina lo que interesa desde el punto de vista productivo. Esto implica que no se debe buscar tener los equipos como si fueran nuevos, sino en condiciones suficientes para realizar bien su función. También implica que se deben conocer con gran detalle las condiciones en que se realiza esta función y, sobre todo, las condiciones que la interrumpen o dificultan, éstas últimas son las fallas.

El proceso de análisis global del RCM se resume como sigue:

- a. Análisis de fallos funcionales. Define el funcionamiento del componente en un equipo, su fallo funcional, y sus efectos de fallo.
- b. Selección de ítems críticos. Determina y analiza que componentes, sistemas se caracterizan como funcionalmente significativos.
- c. Decisión lógica del RCM. Incluye el análisis de los ítems funcionalmente significativos (IS), para determinar la consecuencia del fallo.
- d. Análisis de inspección. La inspección determina qué datos son necesarios para el apoyo del análisis RCM.
- e. Resumen de los requisitos de mantenimiento. Determina la agrupación de los requisitos óptimos del nivel de mantenimiento que se practica.

- **Grupo de trabajo**

El grupo de trabajo es establecido y debe incluir una persona de la función de mantenimiento y de operación y un facilitador especialista en RCM. El grupo de proyecto RCM define y clasifica los objetivos y el alcance del análisis,

requerimientos y políticas de criterio de aceptación con respecto a la seguridad y protección del medio ambiente. Tal como se resume a continuación.

El equipo de trabajo debe ser multidisciplinario, altamente proactivo, conformado por personas de los departamentos de mantenimiento, operaciones y especialistas. Estas personas deberán estar altamente familiarizadas con los temas que les competan.

El grupo será dirigido por un facilitador que podrá o no provenir de los departamentos nombrados anteriormente. El mejoramiento del desempeño implica contribuciones en actitudes, organización, conocimiento, patrones culturales y resultados.

Las funciones del grupo de trabajo están enmarcadas en realizar actividades de mejoramiento continuo en las operaciones de la empresa. Estas pueden ser agrupadas en dos frentes de trabajo.

- Actividades reactivas: Análisis Causa Raíz (ACR), solución de problemas.
- Actividades preactivas: Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).
Con el análisis funcional y análisis de criticidad de equipos.

- **Actividades a realizar**

- Preparar el grupo de trabajo. Seleccionar personal de perfil acorde a la naturaleza del proyecto. Seleccionar reemplazos naturales para cada miembro del grupo, la mejor manera de lograr esto es tener redundancia, es decir dos operadores (por ejemplo), pudiendo estar en cada reunión uno o ambos, garantizando entre ellos mantenerse siempre informados del avance de las actividades. Tener reemplazos que trabajen sólo en caso de emergencia, tiene asociados diversos problemas de índole práctico.
- Preparar un inventario de sistemas a analizar u oportunidades de mejora.
- Realizar el análisis funcional y de criticidad o el análisis de oportunidades de mejora.
- Preparar un orden de implantación del RCM, estimando el impacto positivo para la empresa que pudiera representar una mejoría en los mismos.
- Seleccionar el sistema o problema de mayor impacto posible y de mayor probabilidad de éxito.
- Definir claramente las funciones de los sistemas o la naturaleza de los problemas.
- Establecer una misión precisa y clara en consenso, definir los objetivos del grupo de trabajo.
- Preparar los cronogramas de actividades, la naturaleza de dicho cronograma dependerá del grupo de trabajo, de sus necesidades y limitaciones, pudiendo ser desde una reunión semanal, a reuniones diarias, quinquenales o jornadas de trabajo continuas (por semanas o proyecto).
- El cronograma de trabajo deberá llegar hasta la implantación de actividades y su seguimiento.

- Realizar plan de contingencia, para evitar cualquier retardo debido a problemas previsibles, como permisos, vacaciones de algún integrante del grupo.
- Lograr consenso con la gerencia de la planta sobre los puntos anteriores.
- Comenzar el análisis, partiendo de una sencilla pero concisa documentación de los pasos anteriores.
- Completar el análisis.
- Sugerir soluciones.
- Evaluar la factibilidad económica de las soluciones, recordar que muchas posibles soluciones no son viables desde el punto de vista económico.
- Documentar todo el proceso anterior, realizando pequeños resúmenes a presentar a la gerencia.
- Presentar los resultados a la gerencia de planta, los resultados deberán estar con un completo juicio económico que soporte su implantación.
- Convertir en realidad las sugerencias propuestas y justificadas por el equipo de trabajo.
- Realizar un seguimiento a las actividades y sus resultados, tomar medidas de ser requerido, recordar que se trata de un mejoramiento continuo y no de una mejora por salto al más alto nivel de desempeño.
- Verificar si las actividades son aplicables en otras áreas de la organización e implantarlas de ser necesario.

El facilitador es el líder del equipo de trabajo, deberá facilitar la implantación de las filosofías o técnicas a usar aprovechando las diferentes destrezas del personal que forma el equipo de trabajo, el facilitador deberá ser absolutamente competente en las siguientes áreas:

- a. Técnicas a implantar.
- b. Gerencia del análisis.
- c. Dirección de reuniones.
- d. Administración del tiempo.
- e. Administración, logística y gerencia ascendente.
- f. Las funciones típicas del facilitador incluyen:
 - Organizar y dirigir todas las actividades inherentes al proyecto.
 - Planificación, programación y dirección de reuniones. Garantizar la ejecución de reuniones en cualquier caso, por lo tanto debería manejar alternativas para solventar cualquier inconveniente con los miembros del equipo.
 - Seleccionar el nivel de análisis, definir fronteras y alcance, además de estimar el impacto, la duración y los recursos requeridos para el mismo.
 - Asegurar que cada plazo sea plenamente comprendido antes de su ejecución.
 - Asegurar el correcto orden de implantación, evitando dar saltos metodológicos que afecten la integridad del proceso.
 - Asegurar que el proyecto se cumpla dentro de lo planificado con un margen de error aceptable.

- Coordinar todo el material de apoyo para el trabajo del equipo (planos, diagramas, etc.), así como, mantener al día toda la documentación del proyecto (expedientes, avances, etc.) y compartirla en línea con el grupo.
- Ser el punto focal de comunicaciones del grupo centralizando la información relacionada al tema de trabajo. Mantener a la gerencia informada sobre todos los planes y el progreso de actividades, debe generar constantes informes de elevada calidad.
- Ser la voz técnica que aclare cualquier duda (metodológica) presentada por los miembros de los equipos durante cualquier etapa del proceso.
- En la mayoría de los casos deberá fungir como el transcriptor de la información generada.
- Investigar profundamente sobre temas tratados y no conformarse con información superficial, debiendo en muchos casos dedicarse a corroborar la información generada en las reuniones. Por lo tanto se debe tener el suficiente juicio para saber cuando la participación de un especialista es requerida.
- Debe velar por que las soluciones aportadas por el equipo de trabajo, superen el nivel de informe técnico, es decir sean implantadas realmente.
- Estar en capacidad de reconocer necesidades de adiestramiento (técnico o metodológico) de los integrantes del grupo y prestarlo cuando sea requerido y esté a su nivel.
- Asegurar el consenso de las decisiones tomadas.
- Motivar el grupo.
- Gerenciar los problemas: choques personales, interrupciones, etc.

- **Tareas principales del análisis RCM.**

Los principales elementos del análisis RCM se resumen en doce pasos como sigue:

- Estudios y preparación.
- Definición y selección de sistemas.
- Análisis funcional de la falla.
- Selección de ítems críticos.
- Tratamiento de los ítems no críticos.
- Recolección y análisis de los datos.
- Análisis de los modos de fallo y sus efectos.
- Selección de las tareas de mantenimiento.
- Determinación de los intervalos de mantenimiento.
- Análisis y comparación de las estrategias de mantenimiento.
- Implantación de recomendaciones.
- Seguimiento de resultados.

Estudio y preparación.

Definir claramente los objetivos que se persiguen con el análisis que se va a realizar, ya que su definición condicionará el alcance del estudio. Se selecciona los sistemas objeto de evaluación y se establece el cronograma del proyecto, identificándose los recursos necesarios.

Definición y selección de sistemas.

Después de la definición para la ejecución del análisis RCM en la planta, se consideran dos preguntas:

- ¿Para cuál de los sistemas el análisis es beneficioso, comparado con la planificación tradicional?
- ¿A qué nivel de instalación (planta, sistema, subsistemas, etc.) debe ser conducido la ejecución del RCM?

La descripción de la instalación del proceso jerárquico (registros, flujogramas) es una buena herramienta para el sistema.

Análisis funcional de la falla.

Finalizado el anterior paso, el siguiente es definir e identificar las funciones de los equipos y componentes de los equipos en estudio. Para el sistema seleccionado en el subtítulo anterior en análisis, deben considerarse los siguientes aspectos:

1. Identificar y describir las funciones de los sistemas y el criterio de ejecución.
2. Describir los requerimientos de operación del sistema.
3. Identificar las formas cómo pueden fallar las funciones de los equipos seleccionados.

La aplicación de los Modos de Fallo y Análisis del Efecto es recomendado para este análisis.

Selección de ítems críticos.

El objetivo fundamental de esta tarea es la identificación de los componentes que se consideran críticos para el adecuado funcionamiento del sistema en cuestión. La catalogación de un componente como crítico supondrá la exigencia de establecer alguna tarea eficiente de mantenimiento preventivo o predictivo que permita impedir sus posibles causas de falla.

Para la determinación de la criticidad de la falla de un equipo deben considerarse dos aspectos: su probabilidad de aparición y su consecuencia. La probabilidad de aparición mide la frecuencia estimada de ocurrencia de la falla considerada, mientras que la consecuencia mide la gravedad que el impacto que esa falla puede provocar sobre la instalación.

Si no se dispone de una base de datos fiable y eficiente para el cálculo de las probabilidades mencionadas, se puede considerar como criterio único para catalogar la criticidad de las fallas de los equipos su impacto sobre la función o funciones definidas para el sistema objeto de análisis, si bien conviene establecer las medidas adecuadas para que, en un futuro, se pudiera disponer de la información relativa al término de probabilidad. En algunos casos, puede resultar conveniente subdividir el sistema objeto de evaluación en varios subsistemas claramente delimitados para facilitar su análisis. Estos subsistemas que se analizan como si se tratase de sistemas principales, se caracterizan por desarrollar una función específica en el sistema considerado y están constituidos por uso determinados componentes o equipos.

Las interfases del sistema en cuestión constituirán sus fronteras con otros sistemas de la planta y en su interior están, normalmente, todos los componentes cuya criticidad se va a analizar. En los procedimientos técnicos del proyecto RCM, normalmente se establece una lista de tipos de componentes que, con criterio general, se excluyen del análisis (por ejemplo: válvulas manuales menores de dos pulgadas, soportes rígidos, termopares, etc.).

El análisis de criticidad es, en esencia, un análisis de confiabilidad del sistema considerado y suele consumir un importante nivel de recursos. El método clásico de evaluación de la criticidad de los componentes de un sistema consiste en la determinación, en primer lugar, de las funciones que debe realizar el sistema considerado dentro del conjunto de la instalación, así como de sus fallos funcionales asociados. Para cada uno de estos fallos funcionales, se identifican aquellos componentes cuyo fallo da lugar al fallo funcional en estudio, provocando efectos negativos en la instalación. A estos componentes se les denomina "componentes críticos". Esta evaluación se realiza normalmente mediante la conocida técnica de fiabilidad denominada "Análisis de los Modos de Falla y de sus Efectos" (FMEA).

Para casi todos los sistemas, se suele plantear la optimización de los recursos dedicados al análisis de la criticidad de sus componentes, reduciendo el nivel sistemático del proceso de análisis que supone el desarrollo de un FMEA (Análisis de los Modos, los Efectos, las Criticidades de las Fallas) y el notable volumen de documentación que se genera. En tales casos, se suele usar un método simplificado de análisis, siendo la "Lista de Criticidad" uno de los más utilizados. Este método, basado en la identificación de las consecuencias negativas que pueden producir las fallas potenciales de los diferentes componentes sobre el sistema bajo estudio, consiste en la aplicación de una lista o batería de preguntas a cada componente del sistema considerado, en función de sus respuestas, catalogarlo como crítico o no crítico. Dichas preguntas tienen que ver, entre otros aspectos, con la pérdida de producción, de seguridad, de las condiciones adecuadas de operación o el incremento de contaminación ambiental.

Tratamiento de los ítems no críticos.

En el paso anterior los ítems críticos se seleccionan para el análisis extenso del RCM. Pero ocurre que en el sistema existen ítems que no son analizados, en este caso las plantas tienen un programa de mantenimiento para estos ítems no críticos, o realizar el mantenimiento según las especificaciones técnicas del proveedor.

Aunque la teoría del RCM admite que a los componentes considerados como no críticos se les deje operar hasta su fallo sin aplicarles ningún tipo de mantenimiento preventivo, se recomienda efectuar una evaluación de estos componentes no críticos antes de tomar esta decisión.

Recolección y análisis de los datos.

Los datos necesarios para el análisis RCM, pueden ser categorizados en los siguientes tres grupos:

- Datos de diseño.
- Datos operacionales.
- Datos de confiabilidad.

Para el análisis de los datos, se aplican las técnicas estadísticas y la probabilidad, con el ajuste apropiado a una ley de distribución de probabilidades, que proporcionan, una solución gráfica del análisis de las curvas trazadas; el tipo de análisis que relaciona los posibles modos de falla que puede ser extendido con la revisión de las curvas anteriores.

Análisis de los Modos de Falla y sus Efectos.

El objetivo de este paso es identificar los modos de falla dominantes, tal como se describió anteriormente usándose diferentes métodos de identificación de fallas.

Selección de las tareas de mantenimiento.

El resultado de la tarea de selección de ítems críticos, es la lista de componentes (críticos y no críticos seleccionados) a los que convendrá identificar una tarea eficiente de mantenimiento preventivo o predictivo. El objetivo de la presente tarea es efectuar dicha asignación de actividades de mantenimiento. De forma genérica, el proceso de selección de tareas de mantenimiento se inicia con la identificación de las causas más probables asociadas a los distintos modos de fallo de los componentes considerados.

La aplicación de un Árbol Lógico de Decisión (ALD) es un proceso sistemático y homogéneo para la selección de la estrategia de mantenimiento más adecuada para impedir la causa que provoca la aparición de un determinado modo de fallo correspondiente a un componente del sistema objeto del análisis.

Para la construcción de este ALD, se deberán definir previamente los criterios a considerar y sus prioridades correspondientes. Así por ejemplo, se podrá dar prioridad a la prevención del fallo frente a su corrección, a la aplicación de técnicas de mantenimiento basadas en la condición operativa del equipo frente a actividades periódicas de mantenimiento o considerar aspectos tales como la evidencia de los fallos para los operadores cuando dichos fallos ocurren.

El resultado de esta tarea será el conjunto de actividades de mantenimiento recomendados para cada equipo. Se definirá el contenido concreto de las actividades específicas que deben realizarse y sus frecuencias de ejecución correspondientes. A este respecto, puede resultar de utilidad la elaboración de "plantillas" en las que se recoja el conocimiento disponible sobre el mantenimiento de los distintos tipos de equipos, con el fin de establecer las apropiadas tareas y frecuencias de ejecución de forma sistemática y homogénea, en función de aspectos tales como la criticidad del equipo, su frecuencia de uso o las específicas condiciones ambientales de su entorno operativo, entre otros.

Determinación de los intervalos de mantenimiento.

Para determinar los intervalos óptimos de mantenimiento, es necesaria la información acerca de las fallas, es decir la función de razón de fallos, las consecuencias y los costos de las fallas, etc.

Análisis y comparación de las estrategias de mantenimiento.

El criterio de la selección de las tareas de mantenimiento usadas en el RCM, tiene dos requisitos:

1. Aplicabilidad.
2. Efectividad.

La aplicabilidad: un programa de mantenimiento es aplicable, cuando este puede eliminar la falla, o reducir la probabilidad de ocurrencia hasta un nivel aceptable, reduciendo el impacto de las fallas.

La efectividad: significa que el costo de las tareas de mantenimiento es menor que los costos de las fallas. Las tareas del programa de mantenimiento definidas.

Implantación de recomendaciones.

Una vez seleccionadas las actividades de mantenimiento consideradas más eficientes para los diferentes componentes analizados, se establecen las recomendaciones finales del estudio RCM y se lleva a cabo su implantación. En primer lugar, se efectúa la comparación de las tareas de mantenimiento vigentes en la instalación con las recomendaciones del análisis RCM.

El resultado de esta actividad es el conjunto final de tareas de mantenimiento que se propone aplicar a cada componente. Dichas tareas finales de mantenimiento habrán surgido de aplicar los siguientes criterios:

- Si una tarea vigente de mantenimiento en la planta no ha sido recomendada por el estudio RCM, se propondrá su anulación.
- Si una tarea de mantenimiento recomendada por el estudio RCM no se está aplicando en la actualidad, se propondrá su incorporación al plan de mantenimiento.
- Si una tarea vigente de mantenimiento en la planta coincide con una tarea recomendada por el estudio RCM, se propondrá su retención.
- Si la frecuencia de una tarea vigente de mantenimiento en la planta no coincide con la de una tarea recomendada por el estudio RCM con el mismo contenido, se propondrá su modificación.

A partir de dichas recomendaciones finales, se deberá proceder a la redacción del nuevo plan de mantenimiento que se propone para la instalación. Para ello, es imprescindible la aprobación de las recomendaciones propuestas por parte de la gerencia, quien además fijará los criterios de aplicación y asignará los recursos necesarios.

La elaboración del nuevo plan de mantenimiento, además de las bases técnicas de mantenimiento obtenidas con el análisis RCM, requerirá considerar otros

aspectos tales como los compromisos existentes, ajenos al mantenimiento, que implican la realización de determinadas tareas y el grado de eficacia que se consigue en la agrupación de diferentes actividades de mantenimiento. En algunos casos, será preciso elaborar nuevos procedimientos de trabajo y realizar adaptaciones de los procesos informáticos existentes que pudieran estar relacionados con el tema.

Seguimiento de resultados.

El seguimiento y el análisis de los resultados que se van obteniendo en la planta con la implantación del nuevo programa de mantenimiento son tareas que resultan de capital importancia para la evaluación de su eficacia. Este proceso requerirá por una parte, la definición de los parámetros e índices de seguimiento, la implantación de los pertinentes procesos de captación de la información básica necesaria, el establecimiento del adecuado procedimiento de actuación y la correspondiente asignación de recursos.

La necesidad de considerar nuevas técnicas de mantenimiento, añadir algún posible modo de fallo o componente no analizado inicialmente o revisar las hipótesis de estudio, sus conclusiones entre otras, harán conveniente la actualización global de estudio del RCM, cada cierto tiempo con el fin de minimizar la obsolescencia de las recomendaciones aportadas con el paso del tiempo.

2.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGIA RCS

Durante los años 80 y 90 el proceso de cambio en la industria ha continuado acelerándose. El clima industrial ha demandado mayor disponibilidad y confiabilidad, mayor seguridad e integridad del medio ambiente junto con aún niveles más altos de costo-efectividad.

En respuesta a estas presiones, el mantenimiento se ha desplazado del principio de las reparaciones o sustituciones planeadas a intervalos fijos hacia el enfoque centrado en la confiabilidad, donde el mantenimiento es confeccionado sobre los requerimientos de cada ítem de los equipos en su propio contexto operacional. El resultado es el uso generalizado de equipos de monitoreo de condición para detectar problemas antes de que ocurra la falla, tanto como el reconocimiento de que en algunos casos, simplemente no es costo-efectivo hacer algo para prevenir la falla.

Sin embargo, si la función del inventario de repuestos es apoyar al mantenimiento, debemos asegurarnos que las bodegas de repuestos respondan a los cambios en las políticas de mantenimiento.

Se necesita un método auditable para asegurar que el inventario respalda totalmente a las operaciones y mantenimiento. Este nuevo método es una

extensión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para cubrir repuestos y servicios de almacenes. Es aplicable a cualquier inventario de repuestos, sean consumibles de alta rotación o repuestos de seguridad de baja rotación. En la práctica el mayor retorno se alcanza generalmente mediante el análisis detallado del stock de baja rotación y de mayor costo.

El método de Repuestos Centrados en Confiabilidad (RCS - Reliability-centred Spares) consiste en hacer una serie de preguntas, comenzando con los modos en los que el equipo puede fallar (modos de falla), pasando por los efectos de la falla y los efectos de un faltante (indisponibilidad del repuesto) para establecer la política de stock adecuada para cada repuesto.

La primera pregunta es respondida como parte de un análisis de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM - Reliability-centred Maintenance). Las cuatro preguntas siguientes aseguran que los inventarios de repuestos y sistema satisfagan las necesidades de operaciones y mantenimiento.

Las cinco preguntas básicas de la metodología RCS son:

- ¿Cuáles son los requerimientos de mantenimiento del equipo?
- ¿Qué ocurre si no se dispone del repuesto?
- ¿Es posible predecir la necesidad del repuesto?
- ¿Qué inventario del repuesto es necesario?
- ¿Qué ocurre si los requerimientos de mantenimiento no pueden ser cumplidos?

¿Qué ocurre si no se dispone del repuesto?

RCS basa la decisión de tener inventario no en las recomendaciones del fabricante, o en el juicio de ingeniería, sino en el resultado de analizar qué ocurre si no se dispone del repuesto. Este paso en el proceso hace posible decidir si el faltante nos importa, y por lo tanto qué recursos son necesarios para reducir el riesgo de que ocurra el faltante.

Como RCM, RCS reconoce las cinco categorías de consecuencias:

Ocultas (Riesgo Incrementado)

La falla (para RCM) o faltante (para RCS) por sí solo no tiene consecuencias directas, pero estamos expuestos a un riesgo mayor por las consecuencias de otra falla

Seguridad

La falla o faltante por sí solo, tiene consecuencias directas que pueden herir o matar a alguien

Medio Ambiente

La falla o faltante por sí solo tiene consecuencias directas que pueden llevar a transgredir una normativa o regulación del medio ambiente (en la práctica es raro que falten repuestos en las categorías de seguridad y medio ambiente)

Operacionales

La falla o el faltante por sí solo lleva a una pérdida de producción u otras pérdidas económicas a la empresa

No operacionales

El efecto de la falla o el faltante está limitado al costo de la reparación y obtención del repuesto.

El diagrama de decisión RCS nos lleva a partir del análisis de las consecuencias del faltante a una política adecuada de stock para ese repuesto.

¿Es posible predecir la necesidad del repuesto?

Algunos requerimientos de repuestos, como aquellos que surgen del mantenimiento a rotura, son inherentemente no planificables: los componentes fallan al azar, sin ningún signo evidente de que la rotura está por ocurrir. En cambio, algunos requerimientos pueden ser anticipados:

- Repuestos necesarios para rutinas de reacondicionamiento o sustitución planeadas que ocurren a intervalos regulares sin tomar en cuenta la condición del equipo (preventivo).
- Repuestos sujetos a monitoreo de condición, donde los componentes o equipos son revisados y cambiados si la falla está por ocurrir (predictivo).

El uso de los repuestos que pueden predecirse se conoce generalmente como demanda dependiente.

Los componentes son reparados o sustituidos a intervalos fijos si hay alguna vida característica luego de la cual su confiabilidad se deteriora rápidamente. El mantenimiento preventivo planificado se programa para reemplazar o reparar el componente independientemente del estado a intervalos regulares que son determinados por la vida. Si los intervalos se basan en intervalos de calendario

convenientes, los requerimientos de repuestos pueden ser planificados aún si el tiempo entre requerimientos es menor que el tiempo de entrega.

Uno de los cambios más significativos que dio lugar RCM es el traslado de reemplazos preventivos planificados de la segunda generación de sistemas de mantenimiento hacia tareas a condición. Esto implica revisar la condición de un componente y repararlo o cambiarlo solamente si su condición es inaceptable. Esto crea problemas para el aprovisionamiento, dado que no sabemos si un repuesto será necesario hasta que los resultados de la revisión estén disponibles. Aún así, utilizando las reglas de RCS a menudo es posible evitar tener stocks en el lugar.

¿Qué inventario del repuesto es necesario?

Si no es posible anticipar un requerimiento de repuestos (y por lo tanto evitar tener repuestos), RCS pregunta cuántos repuestos deben tenerse para respaldar a mantenimiento y producción. RCS reconoce que el 100% de disponibilidad es un ideal inalcanzable por un lado e inalcanzable por el otro. Antes de calcular los requerimientos de stock, el analista RCS necesita especificar un parámetro de funcionamiento que depende de las consecuencias del faltante:

Tabla No. 2: Parámetros de funcionamiento del stock de repuestos según categorías.

Categoría	Parámetro de Funcionamiento
Mayor Riesgo	Mínima disponibilidad de la función oculta
Seguridad/ Medio Ambiente	Máxima razón de faltante (faltantes por año)
Operacional	Mínimo costo a lo largo de la vida
No-operacional	Nivel de servicio

En muchos casos el faltante tiene un impacto directo sobre las operaciones (esto generalmente es cierto aún si la falla del equipo tiene consecuencias sobre la seguridad o medio ambiente). RCS utiliza la técnica de costeo por ciclo de vida para determinar los repuestos necesarios.

El beneficio inmediato y más evidente de aplicar RCS a repuestos críticos es que los niveles de stock parten directamente de los requerimientos de mantenimiento y operaciones. Como el método está basado en el análisis de consecuencias, los requerimientos son alcanzados con la inversión óptima en repuestos, comúnmente ahorrando entre 30% y 60% del valor de inventario mientras se cumple con los requerimientos de producción, seguridad y medio ambiente.

El método tiene beneficios humanos además de las mejoras técnicas y financieras alcanzadas:

- Mejora las comunicaciones entre ingeniería, producción y personal de almacenes
- Mejora la comprensión de los requerimientos de los sistemas de inventario y mantenimiento
- Crea una relación más clara y beneficiosa con los proveedores

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso de producción de fertilizantes utiliza como materia prima el ácido nítrico. Para esto, el complejo industrial tiene una planta de producción de ácido nítrico que está ubicada dentro de sus instalaciones y que le suministra el HNO_3 de acuerdo a los requerimientos que esta le exige. El ácido nítrico producido es enviado a un tanque de almacenamiento por medio de una bomba, y luego es succionado de este por medio de otra bomba para ser enviado directamente al proceso de fabricación de fertilizantes compuestos.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL

El ácido nítrico (HNO_3) es un compuesto intermedio en la producción de Fertilizantes y Nitrato de Potasio, una pequeña fracción se comercializa. Se obtiene a partir de Amoniac, aire atmosférico y agua desmineralizada, el proceso de producción se divide en cinco etapas:

COMPRESIÓN DE AIRE

El aire utilizado en la combustión del amoniac es primero filtrado y luego comprimido utilizando un compresor tipo axial movido por una turbina de vapor y una turbina de gases o expandir; el aire comprimido se utiliza para calentar los gases de cola que salen del sistema de Oxiabsorción.

El aire a una menor temperatura pasa al mezclador Amoniac/Aire, está mezcla luego de ser filtrada pasa al reactor catalítico para la conversión de amoniac.

COMBUSTIÓN DE AMONIACO Y PRODUCCIÓN DE VAPOR

La conversión del amoniac se da en el convertidor, que contiene seis mallas de un catalizador metálico de Platino-Rhodio, la reacción es exotérmica y temperatura alcanza los 800-850 °C.

El calor de reacción que se libera en el convertidor se utiliza en una caldera, para producir vapor sobrecalentado de 43 atmósferas absolutas y 385 °C. La caldera está instalada debajo del reactor de combustión, es integrada por una unidad compacta formada por: Primer evaporador, Sobrecalentador, Segundo evaporador y economizador.

OXIDACIÓN Y ABSORCIÓN DEL GAS NITROSO (NO_x)

La Oxidación y absorción del NO se da principalmente en cuatro torres empacadas con anillos rasching, pero se inicia antes en el Enfriador principal. En éste, gran parte del vapor de agua presente en los gases NOx se condensa, produciendo un ácido débil que se envía a una de las torres.

El gas nitroso enfriado entra a la primera torre y es absorbido en contracorriente con agua de proceso, en esta torre se introduce aire adicional proveniente de la torre de blanqueo para la oxidación del NO. El calor resultante de la oxidación, se remueve mediante recirculación a través de enfriadores de placas.

BLANQUEO DEL ÁCIDO PRODUCIDO

El ácido producido contiene óxidos de nitrógeno y debe ser blanqueado, este proceso se realiza en la torre de blanqueo en donde se introduce aire secundario en contracorriente con el ácido producido.

TRATAMIENTO PARA CONTROL DE LAS EMISIONES DE GAS NITROSO (NOx)

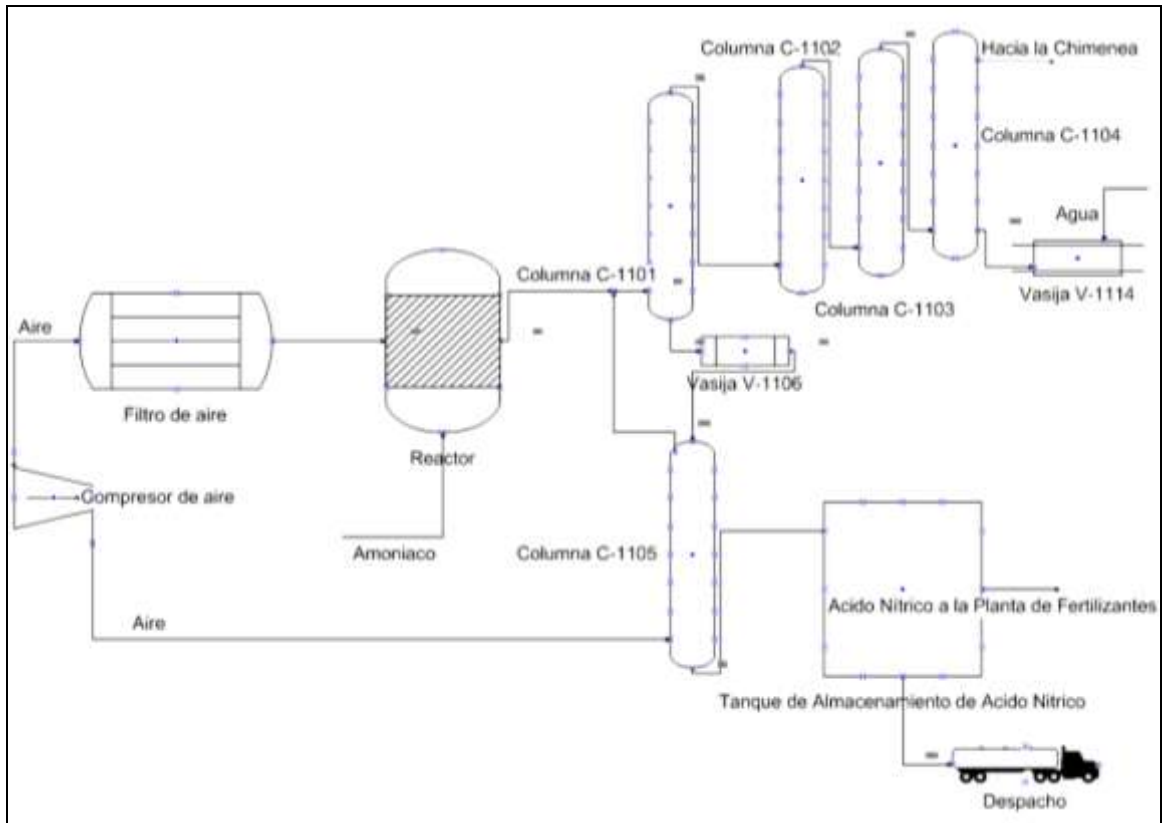
Esta etapa tiene como objetivo disminuir las emisiones de gases NOx a la atmósfera y cumplir la norma de emisiones establecida en Colombia. El gas de cola que sale del sistema de Oxidación y Absorción, previamente precalentado por el aire comprimido, se hacen reaccionar con amoníaco gaseoso en presencia de un catalizador para su conversión a nitrógeno elemental.

Los gases de cola que salen del sistema, llevan energía suficiente para aprovecharla en generar más trabajo, por lo anterior antes de enviarlos a la atmósfera entregan esa energía a la turbina de expansión, que es su vez la transmite al compresor de aire. Los gases son descargados a la atmósfera y su apariencia es totalmente transparente.

USOS

Se utiliza principalmente en la producción de fertilizantes, nitrato de amonio y para las ventas a otras compañías.

Figura No. 1: Diagrama del proceso industrial de producción de ácido nítrico.



3.2 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

El sistema seleccionado para realizar el estudio corresponde a un compresor de aire en una planta de ácido nítrico, como se mencionó anteriormente. Dicho compresor se encarga del suministro de aire a un reactor y se constituye en el inicio del proceso de producción del ácido. Luego de que es producido, el ácido es enviado por medio de una bomba a un tanque de almacenamiento con una capacidad limitada. De allí, es extraído y enviado a una planta de producción de fertilizantes donde es utilizado como producto complementario.

El modo de falla analizado para el compresor corresponde a la salida de servicio de alguno de los componentes del sistema antibombeo de dicho compresor.

La función principal del sistema antibombeo consiste en mantener el flujo del compresor en el mínimo valor permisible, por medio de la apertura de la válvula de antibombeo. El aire que excede a los requerimientos pasa a través de esta válvula hacia la atmósfera de tal forma que el compresor continúa trabajando en el rango estable. La falla de dicho sistema se presenta cuando este es incapaz de desalojar el exceso de aire para mantener una relación estable entre la presión y el flujo en la operación del compresor (Ver Figura No. 2: Diagrama del sistema antibombeo del compresor de aire).

Los componentes del sistema y sus respectivas funciones se enuncian a continuación:

- Posicionador: Compara la señal de entrada con el recorrido de la válvula y modifica su salida de manera que exista la equivalencia requerida.
- Válvula: Controla la salida del exceso de aire para el buen funcionamiento del compresor.
- Solenoide: Permite una rápida apertura de la válvula XPV-11A03 cuando el compresor sale de servicio por cualquier causa.
- Controlador: Recibe las señales de presión y flujo, las computa, analiza y emite señales de salidas análogas y lógicas para controlar el antibombeo del compresor.
- Booster: Incrementa la velocidad de salida del aire del motor de la válvula cuando actúa la solenoide de corte permitiendo una rápida acción de apertura de la válvula.

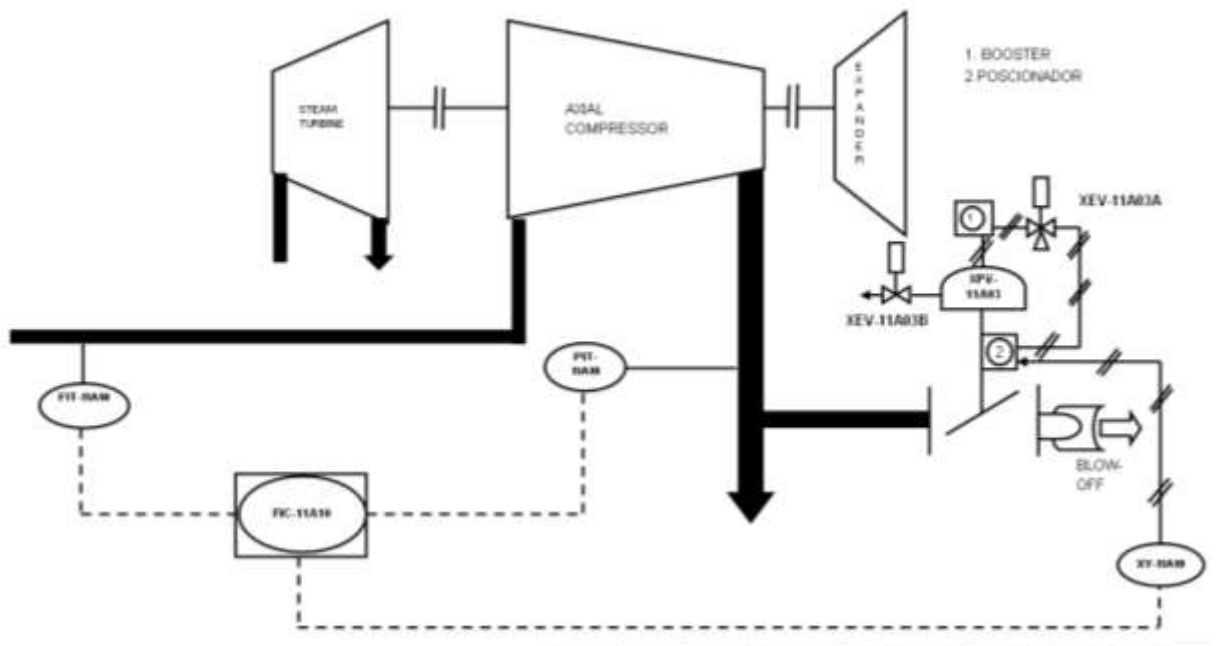
Los modos de falla que se podrían presentar son diversos:

- La válvula presenta pase.

- El diafragma se encuentra roto.
- La solenoide no actúa.
- El controlador se encuentra desconfigurado.
- La tarjeta de salidas lógicas del controlador sufre una avería.

El análisis de modos de falla y efectos se muestra en el anexo No. 1. Las acciones a ejecutar sin embargo, se limitan al cambio del componente del sistema antibombeo que sufra la avería. Es decir, existen muy pocos casos en los cuales se contemple la reparación de estos y no el cambio.

Figura No. 2: Diagrama del sistema antibombeo del compresor de aire.



4. OPTIMIZACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

El cálculo del nivel óptimo de inventario de repuestos para las partes que conforman el compresor de aire de la planta de ácido nítrico se inicia con la recopilación de la información de los modos de falla del equipo, incluyendo la fecha y hora en que este salió y entró en servicio y la descripción de la falla presentada. La hoja de vida del equipo, los reportes de ejecución de mantenimiento realizados al equipo, la información encontrada en el sistema de administración de mantenimiento de la compañía y los archivos suministrados por los ingenieros de mantenimiento fueron las principales fuentes de información para esta recopilación de datos. Esta información fue posible recopilarla desde 1996 hasta el 2007 (Ver Anexo No. 2: Historial de fallas del compresor de aire de 1996 hasta el 2007)

A partir de esta información se procede al cálculo de tres variables que posteriormente se utilizarían: tiempo fuera de servicio, tiempo entre fallas y tiempo operativo del equipo.

El tiempo fuera de servicio viene dado por el tiempo transcurrido en el cual el equipo está siendo intervenido para restablecer sus condiciones iniciales. El tiempo entre fallas se refiere a la diferencia en tiempo entre la ocurrencia de las fallas. Y, el tiempo operativo se refiere al tiempo en el que equipo se encuentra en servicio.

Posterior al cálculo de estas tres variables, se procede a la primera fase de la tipificación de los modos de falla presentados. Estos se dividieron en tres tipos o categorías a saber:

- i. Fallas por operación de la planta (FP): Corresponde a aquellos eventos en los cuales el equipo sale de servicio por causas propias de la operación de la planta o por diversas razones, diferentes a aquellas que sacan de servicio el compresor; por ejemplo la relación amoniaco / aire está fuera de los parámetros, la recirculación de aire presenta bajo flujo, entre otras.
- ii. Fallas propias del compresor (FC): Corresponde a aquellos eventos en los que el compresor de aire sale de servicio por causas propias de su operación; por ejemplo, fallas de tipo electrónico, mecánico, eléctrico, etc.
- iii. Falla externas a la planta (FEP): Pueden presentarse por políticas de producción, cuando existe alto o bajo nivel de inventario de producto

terminado o de materias primas (amoníaco líquido principalmente) o fallas por suministro de energía.

Estos tres tipos de categorías abarcan la totalidad de las fallas encontradas en la recopilación.

El tercer paso metodológico consiste en analizar las fallas propias del compresor (FC) y descartar los otros dos tipos de falla. Aunque, es posible realizar el cálculo de la disponibilidad real y el tiempo operativo del equipo incluyendo la totalidad de las fallas presentadas, las fallas por operación y las fallas externas a la planta no corresponden a labores de mantenimiento como tal y, en la mayoría de los casos, no implican la utilización de repuestos para restablecer la condición inicial de operación. Estos datos son útiles para llevar una estadística de las salidas de servicio del equipo por razones ajenas a la operación de este y de cuanto limita la producción de ácido nítrico este hecho.

El análisis de las fallas propias del compresor implica una categorización de los modos de falla de este tipo. Esta categorización consiste en una segunda tipificación de los modos de falla únicamente para las fallas propias del compresor (FC), pero adicionando el criterio de la utilización de los repuestos requeridos para ejecutar la labor de mantenimiento y restablecer las condiciones iniciales de operación del equipo. Es decir, el análisis de las fallas propias del compresor consiste en identificar los repuestos requeridos en cada uno de los modos de falla tipo FC y establecer grupos o comunidades de modos de falla que requieran los mismos repuestos.

El cuarto paso consiste en el cálculo del tiempo fuera de servicio, el tiempo entre fallas y el tiempo operativo del equipo, para los tipos de modo de falla comunes, identificando el costo asociado y la cantidad requerida en cada intervención.

Posterior a este cálculo, se procede a determinar la distribución estadística que mas se aproxima a cada uno de los tipos de modos de falla identificados. Para esto se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov y el Input Analyzer de ARENA®. Estos valores son los que se utilizarán en el modelo de simulación para el sub – modelo de creación de fallas. Paralelamente se recopila la información de costos relacionados con los repuestos requeridos, las producciones de ácido nítrico y de fertilizantes del complejo industrial y los costos de no producción en una unidad de tiempo específica. De igual forma, se incluye el tiempo de reabastecimiento de los repuestos en el modelo. En esto consiste el quinto paso de la metodología.

La modelación en ARENA® se desarrolla en el sexto paso de la metodología. Aquí se ingresan todos los datos disponibles recopilados en los pasos anteriores y se recopilan los resultados en una hoja de EXCEL® para su posterior análisis. La

explicación del modelo de simulación se encuentra de forma detallada en el ítem 4.2 de este documento.

El análisis de los resultados obtenidos y la toma de la decisión del nivel de inventario óptimo de los repuestos analizados hacen parte del séptimo y último paso de la metodología. En este punto se describe la función de frecuencia de fallas encontrada, el cálculo de la confiabilidad del equipo para los modos de falla analizados y la elaboración de las gráficas de riesgo Vs. cantidad a mantener en inventario de cada repuesto de acuerdo con el modelo simulado. El concepto de riesgo viene dado tanto por mantener una cantidad determinada de unidades de repuesto en inventario como el riesgo de no tenerla cuando se presente una falla que requiera de este repuesto. El proceso metodológico utilizado se puede apreciar en la Figura No. 3.

Figura No. 3: Esquema de la metodología utilizada en la investigación.



4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

4.2.1 PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA.

Todo modelo de simulación consta de cuatro (4) pasos esenciales; primero: Recolectar los datos pertinentes para poder realizar los cálculos correspondientes que luego serán introducidos en los bloques de ARENA® [10]. Segundo: Con la información organizada se procede a realizar un análisis de la información para determinar la manera óptima de cómo abordar el problema. Tercero: Una vez seleccionada la forma de realizar el modelo, se procede a la elaboración como tal de la estructura de simulación, siempre teniendo en cuenta el uso óptimo de bloques y entidades para poder desarrollar un modelo que sea práctico para personas no familiarizadas con el lenguaje de programación. Cuarto: Se procede a realizar el respectivo análisis de los resultados obtenidos, con el fin de obtener información que permita soportar el proceso de toma de decisiones.

Con la información del historial de fallas se calcularon los datos necesarios de entrada para el modelo: Distribución estadística a la que ajustaban los tiempos operativos del equipo y la estructura de costos que seguiría el modelo.

Después de haber organizado la información, se procedió a determinar la mejor manera de abordar el problema. Se definió que la mejor manera era elaborar un modelo que trabajara con variables que funcionaran como contadores para así poder llevar estadísticas de los resultados arrojados. El modelo cuenta con un modelo principal que simula las operaciones del proceso como tal (bombeo y succión), y tres submodelos: Uno que incluye la formulación de la estructura de generación de fallas, otro donde se simula la acción de los proveedores de repuesto y el tercero donde se simula las bodegas de almacenamiento.

Antes de iniciar la corrida del modelo aparece un formulario diseñado en Excel ® a través de Visual Basic, en el cual se introducen los valores iniciales de inventarios y políticas de inventario, así como la posibilidad de escoger el tipo de falla a analizar.

4.2.2 MODELO PRINCIPAL

El modelo principal que simula las acciones de bombeo y succión consta de los siguientes bloques: **create**, que es el bloque encargado de la emisión de la entidad que hará las veces de unidad de bombeo y succión respectivamente. Para poder controlar la tasa de bombeo se creó un bloque **decide** que le pregunta al

sistema si ha ocurrido una falla; si la respuesta es positiva la entidad pasa a un bloque **hold** en el cual se detiene si y solo si alguna falla ha ocurrido; luego, la entidad solo pasa si no ha ocurrido una falla o hasta que esta haya sido corregida. Luego pasa a un bloque **process** donde se simula el tiempo que tarda la bomba en enviar la cantidad de ácido nítrico que se está enviando en el momento (ver explicación de modelo de control de tasa de succión y bombeo). Luego, pasa a un bloque **assign** donde se contabiliza el valor de la variable LLENADO (se cambia a la tasa de 37.5 para incrementar en gran medida el nivel del tanque). Aquí es donde entra el siguiente bloque **decide**, en el cual se pregunta si el nivel del tanque ha llegado al 80%: si el tanque ha llegado a este nivel pasa por arriba donde llega a un bloque **assign** para cambiar la tasa de llenado a su estado normal y regresa al comienzo del proceso y al bloque **decide**. En ese primer bloque **decide** cuando la respuesta es negativa el proceso es el mismo pero con una tasa normal de llenado. Para poder controlar los tope máximos y mínimos de seguridad del tanque se establece un bloque **decide** donde se pregunta si el nivel del tanque ya es mayor o igual al tope máximo de seguridad; si es así pasa a un bloque **hold** donde se detendrá hasta que la capacidad haya bajado lo suficiente como para seguir enviando producto, si aún no ha llegado al tope máximo, pues continuará realizando este mismo proceso hasta llegar al tope máximo de seguridad y continuar el ciclo (Ver Figura No. 4: Modelo principal del sistema compresor de aire – tanque de almacenamiento)

El modelo de succión sigue la misma lógica con algunas pequeñas variantes. Se le introduce la contabilización de la variable de hora de ocurrencia y finalización de la corrección de la falla, con el fin de saber cuanto tiempo la planta de fertilizantes estuvo detenida, y así poder asociarle el costo por faltante. Esto se hace a través de bloques **assign** donde se les pregunta la hora de entrada y salida, y se efectúa el cálculo de las horas en pausa y su costo asociado (Ver Figura No. 5: Submodelo de llenado y succión)

Figura No. 4. Modelo principal del sistema compresor de aire – tanque de almacenamiento

PROCESO DE LLENADO Y SUCCION

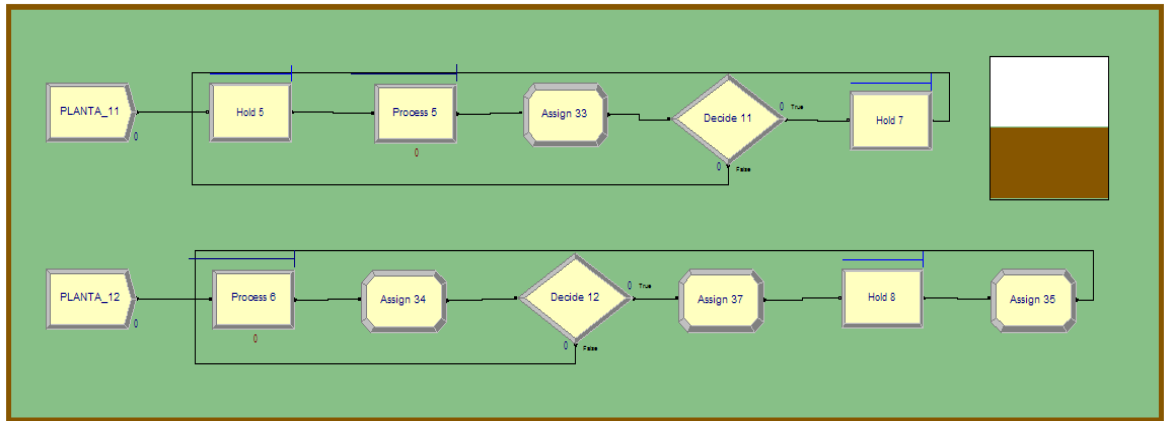
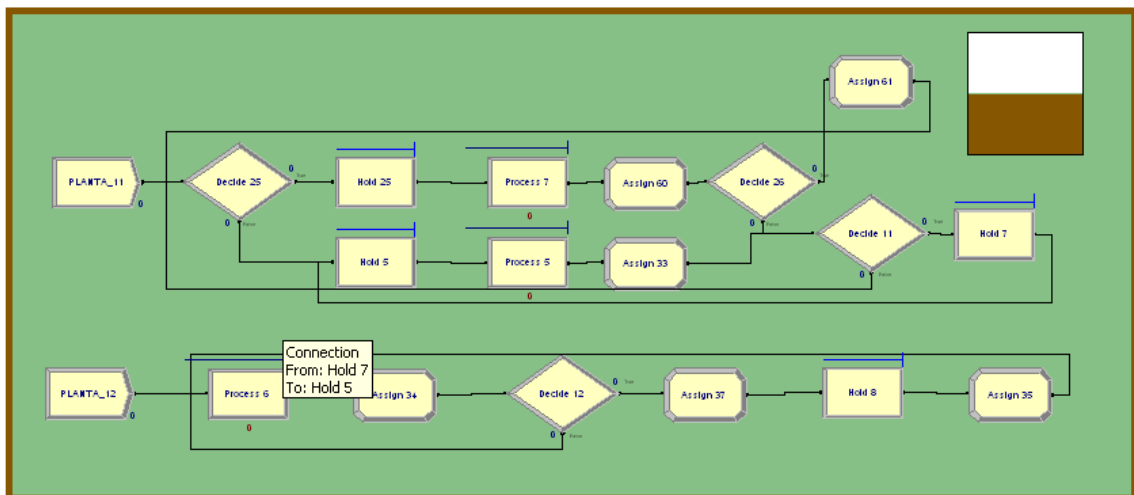


Figura No. 5. Submodelo de llenado y succión

PROCESO DE LLENADO Y SUCCION

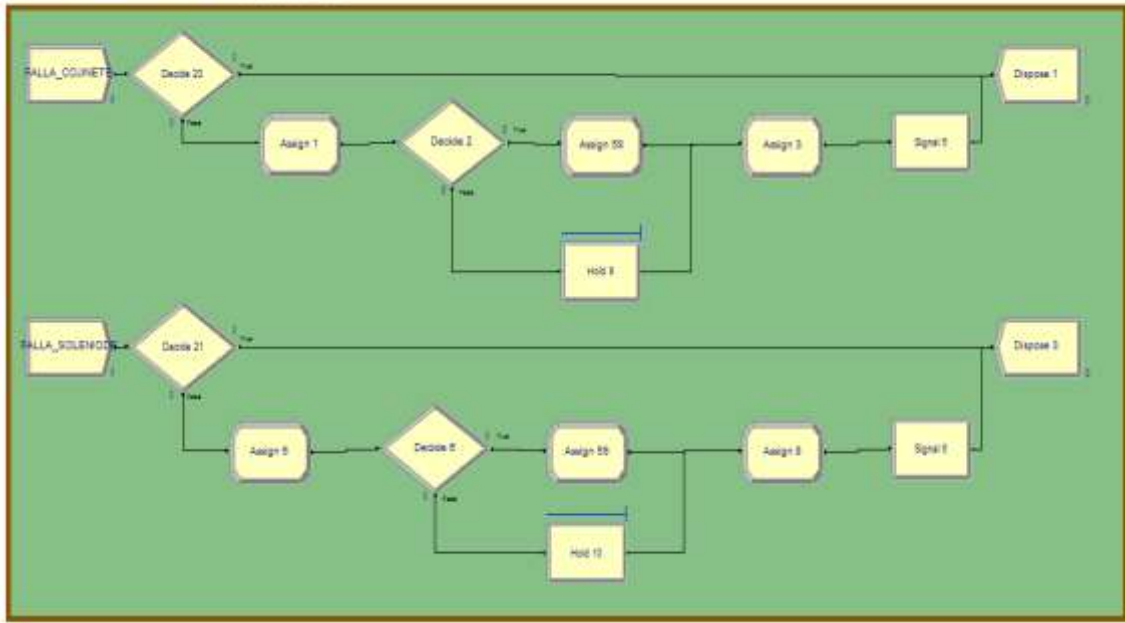


En el modelo se incluye un tanque en el cual se puede observar el cambio de la variable LLENADO gracias a los efectos de succión y bombeo y los cambios que sufren estas tasas a lo largo del modelo.

SUBMODELO MANEJO DE CREACION DE FALLAS

Figura No. 6. Submodelo de creación de fallas

CREACION DE FALLAS



Para el caso de estudio de fallas del compresor se simuló la creación de una falla cuya ocurrencia seguía un tipo de distribución estadística específica.

En la Figura No. 6 se puede observar la estructura básica para la creación de fallas, donde se encuentra un bloque **create** que genera fallas según la distribución que sigue. En este bloque se incluye la opción de controlar cual de la fallas se va a analizar mediante la creación de un check box en el formulario que arroja el programa al iniciarse por medio de Visual Basic.

Al momento de la creación de las fallas se hace una pregunta en un bloque decide que pregunta si existe una falla en la fila del bloque **hold**; este es para decirle al programa que las fallas no son acumulativas, es decir, un tipo de falla no se puede repetir mientras exista una en el sistema. Esta restricción se tomó para tener en cuenta que si se permite que la falla ingrese al modelo altere los resultados y demande repuestos que no sean necesarios. Si hay alguna entidad en la fila del bloque **hold** esta sigue su camino por arriba directo al **dispose**, lo que significa que ya existe una falla en el sistema.

Por otro lado de no haber entidades en la fila del bloque **hold** este sigue su camino hacia un bloque **assign**, donde se le cambia el estado al sistema y se

definen los requerimientos o demanda de repuestos de la falla. El estado del sistema se cambia por medio de la variable ESTADO DE FALLA, que al momento de pasar la falla por este bloque le suma a la variable el valor de uno, y, como se mencionó anteriormente, el bloque **hold** del proceso de llenado solo funciona mientras esa variable de ESTADO DE FALLA tenga el valor de cero. Mas adelante se verá en que parte del modelo se le vuelve a cambiar el estado por medio de la resta de uno al momento de corregir la falla. Cada falla tiene su demanda de repuestos la cual se asigna en este bloque, esto con el fin de saber cuantas partes debe haber del tipo de repuesto para corregir dicha falla. La variable DEM_##### esta asociada con la cantidad de partes por cada tipo de repuestos.

Después de pasar por el bloque **assign**, llega a un bloque **Decide** donde le pregunta si la variable inventario es igual a la variable de demanda. Esta pregunta es para determinar si el inventario en existencia del tipo de repuesto necesario es igual a la demanda. Si la afirmación es verdadera la entidad sigue por arriba lo cual significa que existe inventario en bodega para corregir la falla y sigue a un bloque **assign** donde se le asigna un contador para determinar cuantas veces encontró el repuesto necesario.

Si la pregunta resulta falsa y la demanda es mayor a la cantidad existente en bodega, significa que no hay repuestos suficientes para corregir la falla y deberá esperara en un bloque **hold** hasta que el repuesto esté disponible en la bodega. Es decir que la condición que el **hold** espera para liberarla es hasta que la variable DEM_##### sea igual a la variable INV_#####.

Al ser liberada por el **hold** sigue a un **assign** donde se junta con las entidades que pasaron por arriba. En el bloque **assign** se contabiliza el numero total de veces que se buscaron entidades o repuestos para llevar un control estadístico en Excel de las veces que encontró repuesto. En este bloque también se maneja el retiro de los repuestos necesarios, por medio de una resta de variables donde a la variable INV_##### se le resta la variable DEM_#####.

Debido a que se encontró el repuesto requerido, el estado de falla cambia a un estado normal. Como se manejó el estado de falla mediante el bloque **hold** (sumándole a la variable ESTADO FALLA uno), ahora se le resta a la variable ESTADO FALLA uno para habilitar el **hold** en el proceso de llenado.

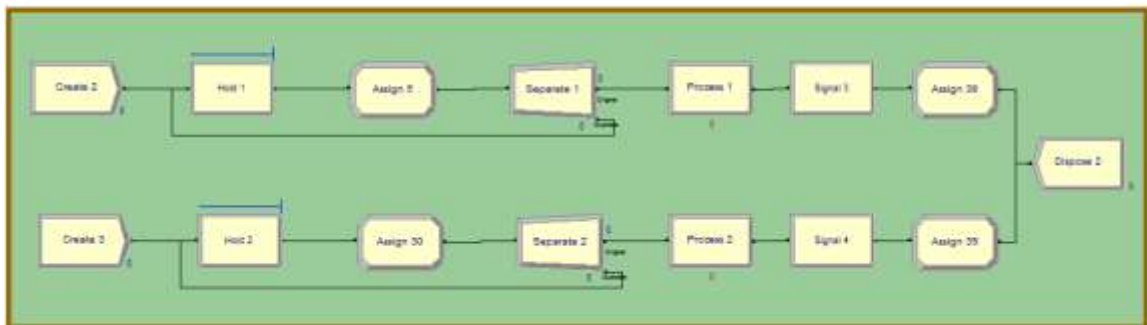
El paso siguiente es un bloque **signal** donde emite una señal que libera los repuestos en el bloque **hold** que se encuentra al final del proceso de la bodega de repuestos, esto con el fin de simular el momento en que el repuesto sale de la bodega de repuestos y poder determinar el tiempo que permaneció el repuesto en inventario y poder evaluar el valor o los costos incurridos para el almacenamiento del repuesto en ese período de tiempo.

4.2.3 SUBMODELO PROVEEDORES DE REPUESTOS

Aquí se trabaja la acción de respuesta de los proveedores en la eventualidad de una falla. Se trabaja dos submodelos haciendo alusión que los repuestos necesarios para corregir un tipo de falla son suministrados por diferentes proveedores (Ver Figura No. 7: Submodelo de proveedores de repuestos). Cada modelo consta de un bloque **create** donde se emite una entidad que activa el modelo, pasa a un bloque **hold** donde es detenida si y solo si el nivel de inventario de dicho repuesto es menor o igual al punto de reorden (R) establecido en las políticas de inventario y además, no se ha hecho un pedido con anterioridad. Luego pasa a un bloque **assign**, donde se establece la cantidad a pedir y el costo del pedido; para efectos de optimización y ahorro de entidades se introduce un bloque **separate** donde hace un duplicado de la entidad: una sigue el camino original del submodelo y otra vuelve al comienzo para iniciar la lógica otra vez. Para simular el tiempo de respuesta de los proveedores es utilizado un bloque **process**, donde se le especifica que retenga la entidad el tiempo que demoran los proveedores en atender el pedido. Después de allí pasa a un bloque **signal** donde emite una señal a la bodega de repuestos para que libere la cantidad de repuestos que esta ingresando a la bodega, luego pasa a un bloque **assign** donde aumenta el inventario en la cantidad que se ordenó. El modelo asume que siempre que se presenta una falla se cambia el componente que produjo la falla. Es decir, dicho componente no es reparable.

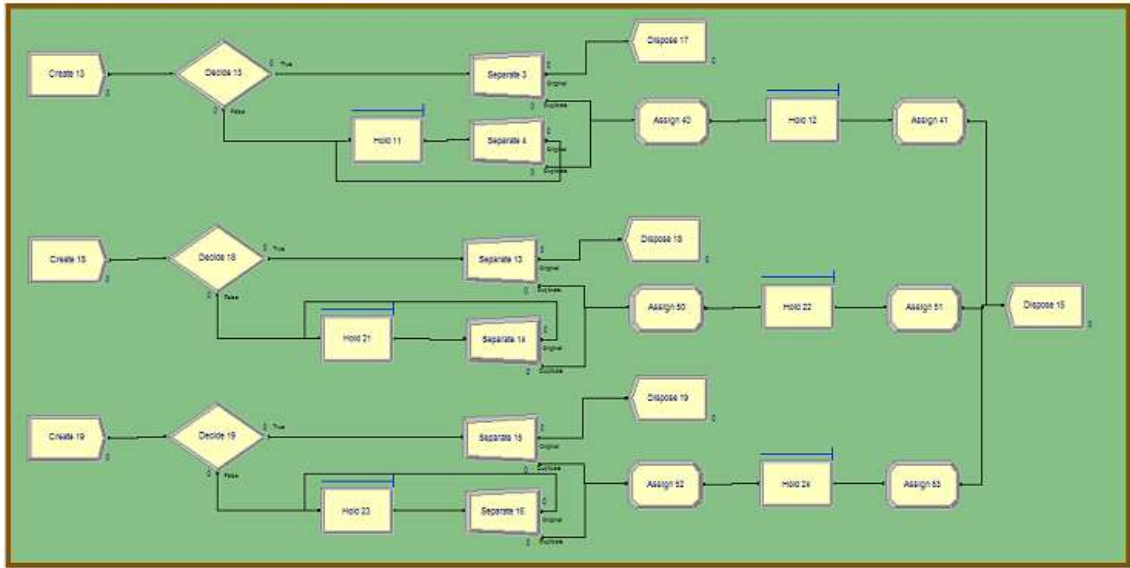
Figura No. 7 Submodelo de proveedores de repuestos

PROVEEDORES DE REPUESTOS



SUBMODELO MANEJO DE BODEGA DE REPUESTOS

Figura No. 8. Submodelo de manejo de la bodega de repuestos
BODEGA DE REPUESTOS



En la bodega de repuestos para poder cargar los datos iniciales del inventario que se ingresa en el formulario fue necesario hacer dos creaciones (Ver Figura No. 8: Submodelo de manejo de la bodega de repuestos). El primer bloque **decide** hace la pregunta si el tiempo es igual a cero esto con el fin de simular el inventario inicial (Ver Figura No. 9: Expresión para determinar el inventario inicial del repuesto). Si la pregunta es verdadera la entidad sigue a un bloque **separate** donde el original se va para un bloque **dispose** y el número de duplicados es igual a la variable INV_####, la cual toma sus valores iniciales en el formulario al comienzo de la simulación. Si la pregunta es falsa el tiempo es diferente de cero y por lo tanto ya no son valores iniciales.

Figura No. 9. Expresión para determinar el inventario inicial del repuesto BODEGA DE REPUESTOS

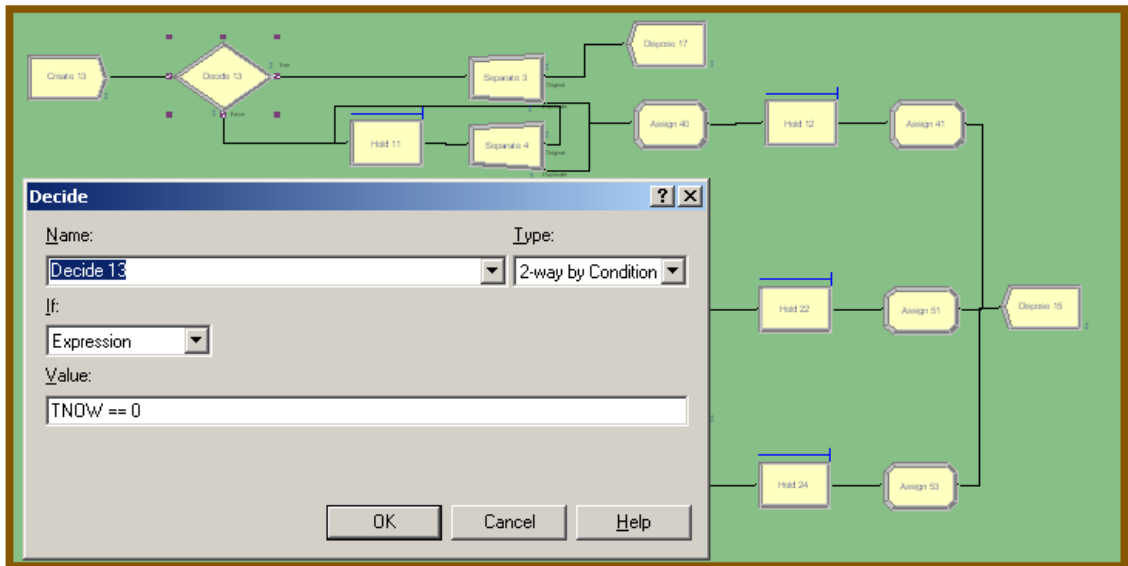
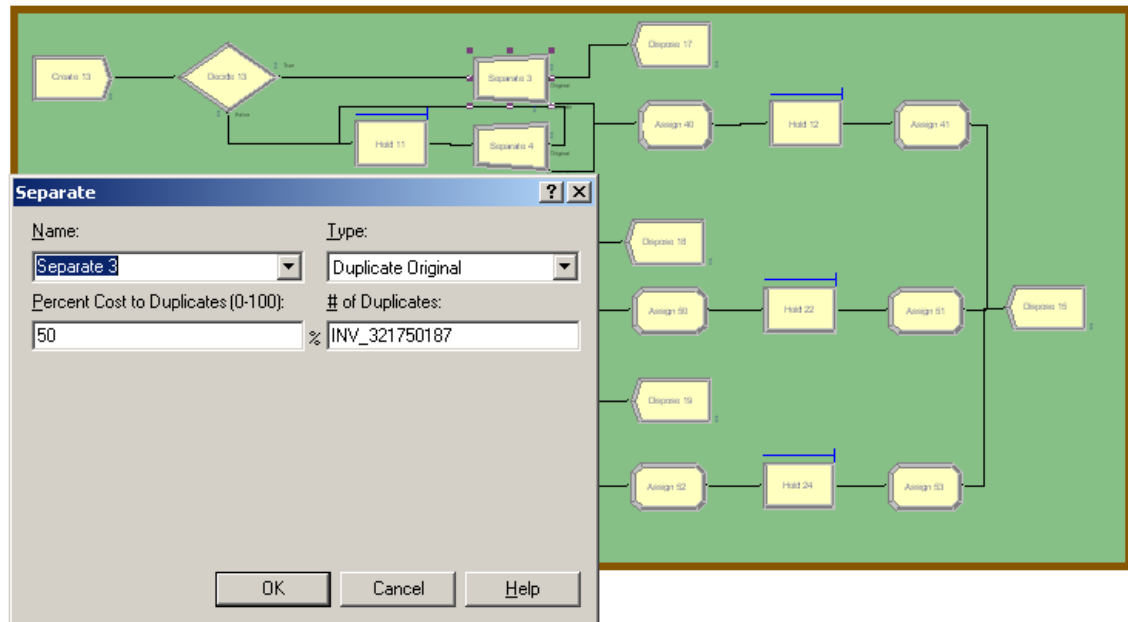


Figura No. 10. Expresión para regresar a los valores iniciales dados al modelo BODEGA DE REPUESTOS



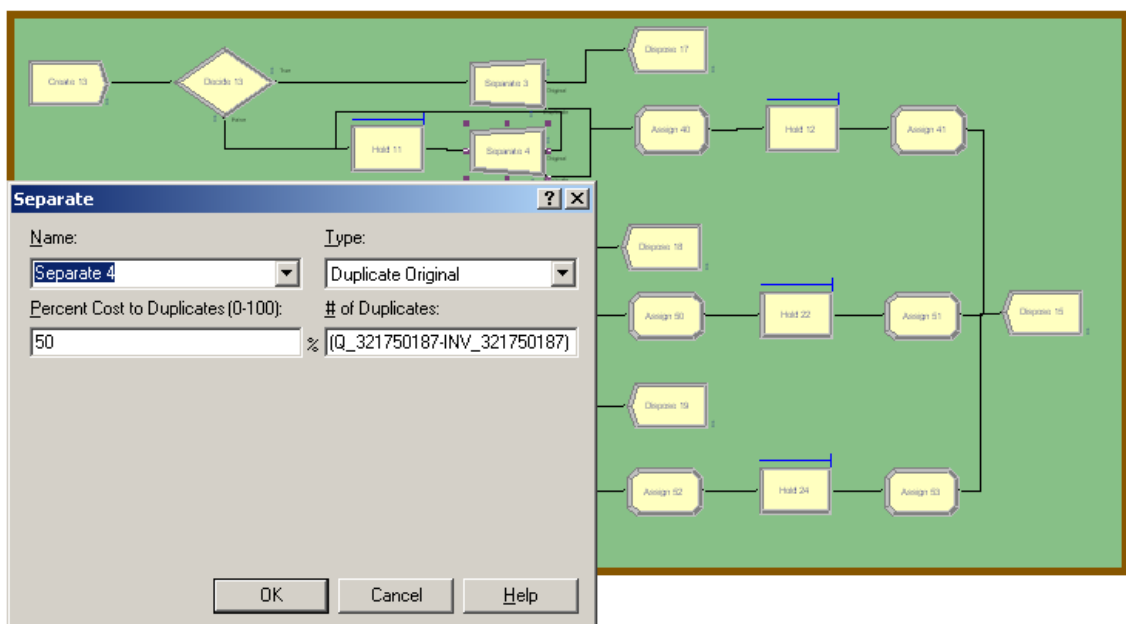
La entidad sigue a un bloque **hold** que hace de papel del proveedor a la espera de una señal de valor 1 para liberar la entidad. La señal esta ligada al momento en que se solicitan los repuestos y sigue a una bloque **Separate** (Ver Figura No. 10: Expresión para regresar a los valores iniciales dados al modelo), en donde el

original se devuelve al bloque **hold** a la espera de una nueva señal con el fin de minimizar el número de entidades en el sistema.

En el bloque **separate** el numero de duplicados es igual al numero de entidades o repuestos que fueron pedidos, por eso esta dado por la expresión (Q_#### - INV_####). (Ver Figura No. 11: Expresión para determinar la cantidad de unidades del repuesto que se ordenaron)

Figura No. 11. Expresión para determinar la cantidad de unidades del repuesto que se ordenaron

BODEGA DE REPUESTOS

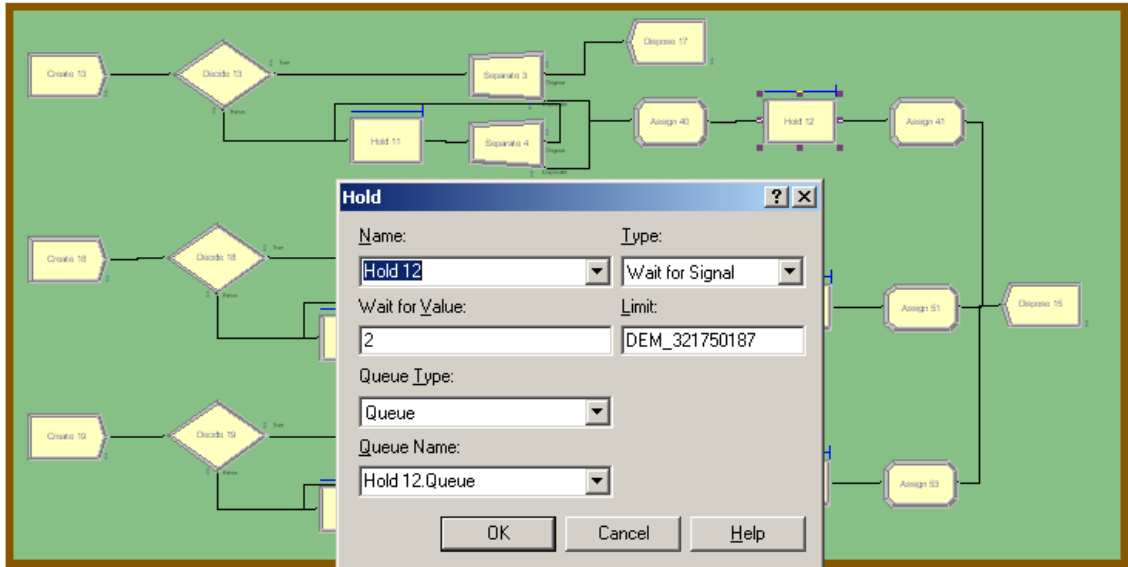


El paso siguiente es un bloque **assign**, el cual fue creado con el fin de tomar el tiempo de entrada del repuesto para poder llegar a los costos asociados con el tiempo de inventario en bodega.

Las entidades llegan seguidamente a un bloque **hold** (Ver Figura No. 12: Determinación del momento en que se requirieron las unidades del repuesto) donde esperan por un señal de valor 2 que simboliza el momento en el cual son requeridas, por eso el numero de entidades liberadas es igual a la variable DEM_####, lo requerido para arreglar una falla.

Figura No. 12. Determinación del momento en que se requirieron las unidades del repuesto

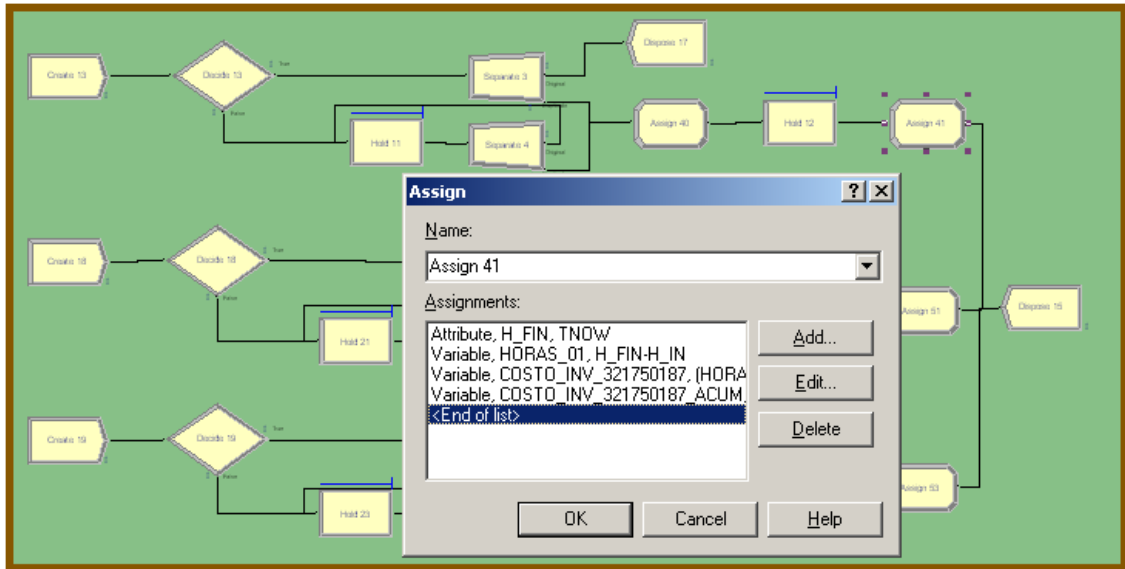
BODEGA DE REPUESTOS



El último paso de la entidad antes de llegar a un bloque **dispose** es un bloque **assign**, donde se registra el tiempo de salida y se le resta el tiempo de entrada para conocer el tiempo total que permanece el repuesto en inventario. (Ver Figura No. 13: Registro del tiempo en que permaneció almacenado el repuesto en la bodega de materiales). Al mismo tiempo se toma ese tiempo hallado y se le multiplica por un valor que varía dependiendo del porcentaje sobre el valor y teniendo en cuenta el equivalente en horas es decir si al artículo se le descuenta 5% anual del valor, es necesario encontrar el equivalente en horas haciendo la conversión. Además del costo unitario se creó un contador que registra el costo acumulado para totalizar el gasto total en horas de inventario.

Figura No. 13. Registro del tiempo en que permaneció almacenado el repuesto en la bodega de materiales

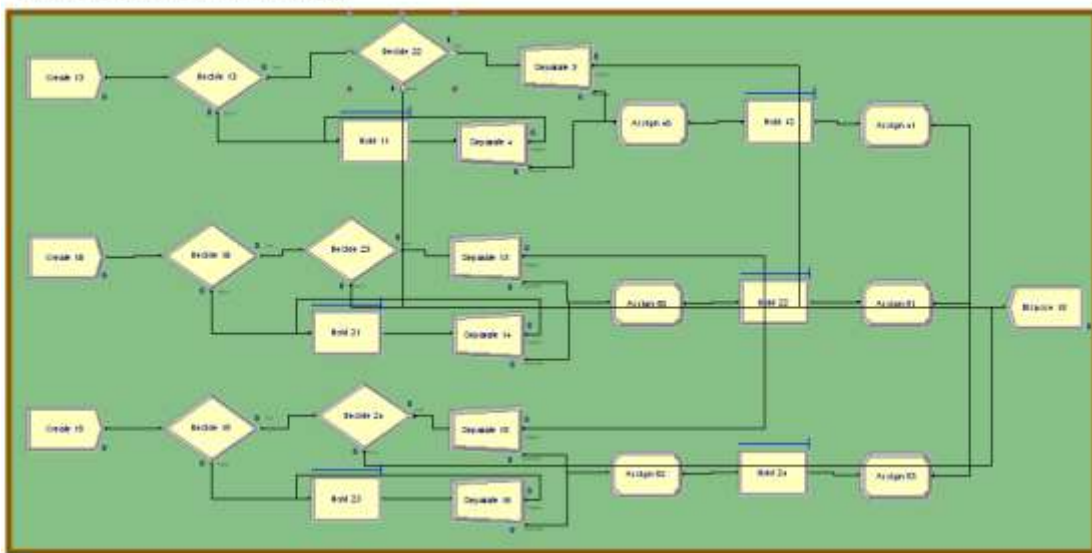
BODEGA DE REPUESTOS



Después de haber desarrollado el modelo se agregó un bloque **decide** para la bodega de repuestos y evitar que llegara a ocurrir el caso en donde el inventario llegara a ser cero y el bloque **separate** al momento de duplicar no se encontrara con inconsistencias (Ver Figura No. 14: Inclusión del bloque **decide**). Cabe resaltar que lo demás sigue su mismo funcionamiento, si el inventario es diferente de cero sigue al **bloque** decide si no sigue a un **dispose**.

Figura No. 14. Inclusión del bloque decide

BODEGA DE REPUESTOS



4.3 CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS

Las variables y los parámetros utilizados en la modelación se describen a continuación:

- λ : Tasa de fallas (Cantidad de fallas / año).
- Q_0 : Inventario inicial del repuesto en bodega de materiales (Unidades). (2)
- D_0 : Demanda del repuesto en el momento en que se presenta una falla (Unidades). (3)
- P_0 : Cantidad a pedir del repuesto [Cuando $Q_0 > D_0$:]
- R_0 : Punto de reorden (Unidades).
- U_H : Producción de ácido nítrico (Toneladas / hora).
- U_F : Producción de fertilizantes (Toneladas / hora).
- L_T : Nivel del tanque de ácido nítrico (m^3).
- σ_B : Capacidad de envío de ácido nítrico (Toneladas / hora).
- σ_S : Capacidad de succión de ácido nítrico (Toneladas / hora).
- C_{rep} : Costo del repuesto (\$ / unidad).
- C_{alm} : Costo de almacenamiento (\$ / hora).
- C_{np} : Costo de no producción (\$ / hora).
- T_{alm} : Tiempo de almacenamiento del repuesto en la bodega (horas).
- T_{mto} : Tiempo de ejecución de mantenimiento (horas).
- LT : Tiempo de reabastecimiento del repuesto (horas)

El modelo minimiza el costo total de operación del sistema cuando se presenta una falla:

Min.: CostoTotal(CT)

$$CT = C_{rep.} + C_{alm} + C_{np}$$

$$CT = [D_0 \times C_{rep.}] + [Q_0 \times C_{alm}] + [T_{mtto} \times C_{np}]$$

Consideraciones del modelo propuesto:

- El modelo propuesto considera que las reparaciones realizadas al equipo luego de presentada la falla devuelven a este sus condiciones iniciales de operación.
- No se tienen en cuenta los mantenimientos preventivos que se le realizan al equipo con una frecuencia determinada, ya que en los programas de mantenimiento que se ejecutan con dicha frecuencia no se contempla el modo de falla analizado.
- El momento de entrega del repuesto está sujeto a un tiempo de reabastecimiento que se supone fijo. No es aleatorio.
- Los parámetros iniciales de Q_0, P_0 , se suponen $[0, 1]$ respectivamente.
- Los parámetros de Tiempo Operativo, Tiempo de Mantenimiento y Tiempo Entre Fallas, vienen dados por los datos recopilados de la historia de funcionamiento del equipo.
- Los componentes que fallan en el equipo siempre son cambiados (no son reparados).

Dadas estas consideraciones se procede a aplicar la metodología descrita. El tiempo simulado en cada corrida fue de 5 años.

Luego de realizada la tipificación de los modos de falla identificados en el equipo, se procedió a la realización de la prueba de bondad de ajuste de los datos para definir el tipo de distribución estadística que seguían estos. Los datos que se tuvieron en cuenta para realizar esta prueba fueron los correspondientes al Tiempo Operativo. Esta prueba se realizó utilizando el Input Analyzer de ARENA®.

Los resultados indican que los datos se ajustan a una distribución exponencial con media 0.0474 fallas / mes.

$$F(x) = \text{EXPO}(0.0474)$$

Teniendo en cuenta esta información, el modelo cuenta con tres parámetros en su estructura como tal:

- Tiempo de reabastecimiento (Lead Time)
- Costo de Almacenamiento

- Tiempo Promedio Operativo (TPO)

Estos parámetros se suponen fijos dentro del modelo.

Con el fin de verificar la robustez del modelo se realizó un análisis factorial 2^3 , para estudiar el efecto que tienen estos factores en el costo total de operación del sistema. Esto es:

A = Tiempo de reabastecimiento = (54, 66 días)

B = Costo de Almacenamiento = USD (95.4, 116.6)

C = Tiempo Promedio Operativo = (568.78, 695.18 días)

Tabla No. 3. Niveles de los factores en el diseño experimental

Niveles del Factor	
Bajo (-1)	Alto (+1)
A (días) = 54	66
B (USD) = 95.4	116.6
C (días) = 568.78	695.18

El diseño del experimento del costo total de operación se muestra en el siguiente diseño [11]:

Tabla No. 4. Diseño del experimento para determinar el efecto de los factores A, B y C en el costo total de operación del sistema.

Num. Corrida	orden de la corrida	A	B	C	Etiqueta
1	5	-	-	-	1
2	3	+	-	-	a
3	1	-	+	-	b
4	7	+	+	-	ab
5	2	-	-	+	c
6	8	+	-	+	ac
7	6	-	+	+	bc
8	4	+	+	+	abc

La variable de respuesta que se analizó fue el costo total de operación de mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 unidades de repuesto en inventario. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla No. 5. Resultados obtenidos en el modelo de simulación

Num. Corrida	Orden de la corrida	A	B	C	Costo (M\$)					
					0	1	2	3	4	5
1	5	-	-	-	\$10,162,295	\$63,452	\$63,704	\$69,830	\$88,360	\$119,315
2	3	+	-	-	\$11,348,443	\$63,397	\$63,676	\$69,830	\$96,717	\$123,605
3	1	-	+	-	\$10,161,309	\$65,199	\$65,507	\$72,995	\$101,739	\$130,483
4	7	+	+	-	\$11,350,116	\$65,132	\$65,473	\$72,995	\$101,739	\$195,283
5	2	-	-	+	\$10,162,331	\$63,452	\$63,704	\$70,652	\$92,283	\$124,426
6	8	+	-	+	\$11,248,442	\$63,397	\$63,676	\$70,652	\$97,539	\$124,426
7	6	-	+	+	\$10,164,023	\$65,199	\$65,507	\$73,946	\$102,743	\$131,487
8	4	+	+	+	\$11,350,116	\$65,132	\$65,473	\$73,999	\$102,743	\$131,487

Cada réplica se corrió por un tiempo de 5 años. Los resultados muestran que, para todos los casos el costo mínimo se obtiene cuando se mantiene una unidad almacenada del repuesto, lo cual podría indicar lo robusto del modelo ante variaciones en los factores analizados.

Teniendo en cuenta lo anterior y siguiendo el procedimiento para realizar un análisis 2^K , se procede a realizar la estimación del efecto de los factores:

$$A = 1/4n * [a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc]$$

$$B = 1/4n * [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]$$

$$C = 1/4n * [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]$$

$$AB = 1/4n * [ab - a - b + abc + (1) - bc - ac + c]$$

$$AC = 1/4n * [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc]$$

$$BC = 1/4n * [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]$$

$$ABC = 1/4n * [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]$$

Los resultados de cada una de las etiquetas se muestran a continuación:

Tabla No. 6. Estimación de los efectos de los factores cuando se mantiene una unidad en spare.

Num. Corrida	orden de la corrida	A	B	C	Etiqueta	1
1	5	-	-	-	1	\$57,320,739
2	3	+	-	-	a	\$57,308,643
3	1	-	+	-	b	\$64,326,111
4	7	+	+	-	ab	\$64,265,055
5	2	-	-	+	c	\$57,320,721
6	8	+	-	+	ac	\$57,308,625
7	6	-	+	+	bc	\$64,326,020
8	4	+	+	+	abc	\$64,264,964

En consecuencia, los efectos de los factores son los siguientes:

A = -61056
 B = 1741107
 C = -91,05
 AB = -6106
 AC = 0
 BC = -8,75
 ABC = 0

El efecto más grande se presenta para el costo de almacenamiento del repuesto (B = 1741107). Otros efectos significativos son el tiempo de reabastecimiento de este (A = -61056) y la interacción de estos dos (AB = -6106). La estimación de los efectos de los factores y las sumas de cuadrados del diseño factorial se presenta en la siguiente tabla:

Tabla No. 7. Estimación de los efectos de los factores y suma de cuadrados del diseño factorial.

Término del modelo	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución porcentual
A	61,055.950	7455658061	0.122819075
B	1,741,107.350	6.06291E+12	99.87595236
C	91.050	16580.205	2.7313E-07
AB	6,105.850	74562808.45	0.001228293
AC	0.050	0.005	8.23664E-14
BC	8.750	153.1249999	2.52247E-09
ABC	0.050	0.004999999	8.23663E-14

El análisis de varianza realizado al experimento muestra lo siguiente:

Tabla No. 8. Análisis de Varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Fo
A	7455658061	1	7455658061	29822632243
B	6.06291E+12	1	6.06291E+12	2.42516E+13
C	16580.205	1	16580.205	66320.81999
AB	74562808.45	1	74562808.45	298251233.8
AC	0.005	1	0.005	0.020000001
BC	153.1249999	1	153.1249999	612.4999997
ABC	0.004999999	1	0.004999999	0.019999998
<i>Error</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>0.25</i>	
<i>Total</i>	<i>2.685E+12</i>	<i>7</i>	<i>3.83571E+11</i>	

Dichos resultados confirman lo analizado en la estimación de los efectos de los factores, ya que la interacción AC (Tiempo de Reabastecimiento y Tiempo Operativo) y la interacción entre los tres factores no afectan de manera significativa al costo total de operación del sistema cuando se presenta una falla en el sistema antibombeo del compresor de aire.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se había mencionado anteriormente, el tiempo de cada corrida del modelo fue de 5 años. El valor de cada uno de los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

$$Q_0 = 0$$

$$D_0 = 1$$

$$P_0 = 1$$

$$R_0 = 0$$

$$L_T = [0,945]$$

$$\sigma_B = 22$$

$$\sigma_S = 22$$

$$C_{rep} = \$10.000.000$$

$$C_{alm} = 5\%$$

$$C_{np} = USD4.200$$

$$LT = 60días$$

Sin embargo, el valor del inventario inicial Q_0 se actualiza cada vez que se vaya a correr el modelo de simulación. Esto se hace con el fin de simular cada uno de los estados posibles en la bodega de repuestos. Es decir, es posible que cuando se presente la falla se encuentren 0, 1, 2, ..., n unidades en inventario. En el modelo propuesto se simuló hasta 5 unidades.

El tiempo computacional es relativamente corto (3.25 minutos aproximadamente).

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 5.

Los resultados muestran que el valor del inventario en spare que minimiza el costo total de operación del sistema es uno (1). Esto, para un tiempo de cinco (5) años. Cabe resaltar que el valor del costo viene dado por el concepto de riesgo de mantener una cantidad predeterminada de unidades de repuesto en spare, lo cual implica que se deben tener en cuenta los costos por indisponibilidad, el costo de inmovilización del repuesto y el costo mismo del repuesto, que fueron los parámetros de costo que se contemplaron en el modelo.

Los resultados también muestran que el hecho de mantener dos (2) unidades en spare implican un incremento aproximado del 0.76% en el costo total de operación del sistema en la mayoría de las corridas.

Lo anterior implica que la persona que deba tomar la decisión de la cantidad de partes a mantener en spare puede contemplar la posibilidad de incrementar el valor óptimo de una unidad a dos (2), dado que el incremento del costo asociado es muy bajo en comparación con la minimización del riesgo que implicaría la indisponibilidad del repuesto cuando se presente una falla.

En la figura No. 13 se puede apreciar la gran diferencia que existe en cuanto al riesgo de no mantener unidades en spare y mantener una o más.

Figura No. 15. Costos totales de operación del sistema por unidades de repuesto en spare.

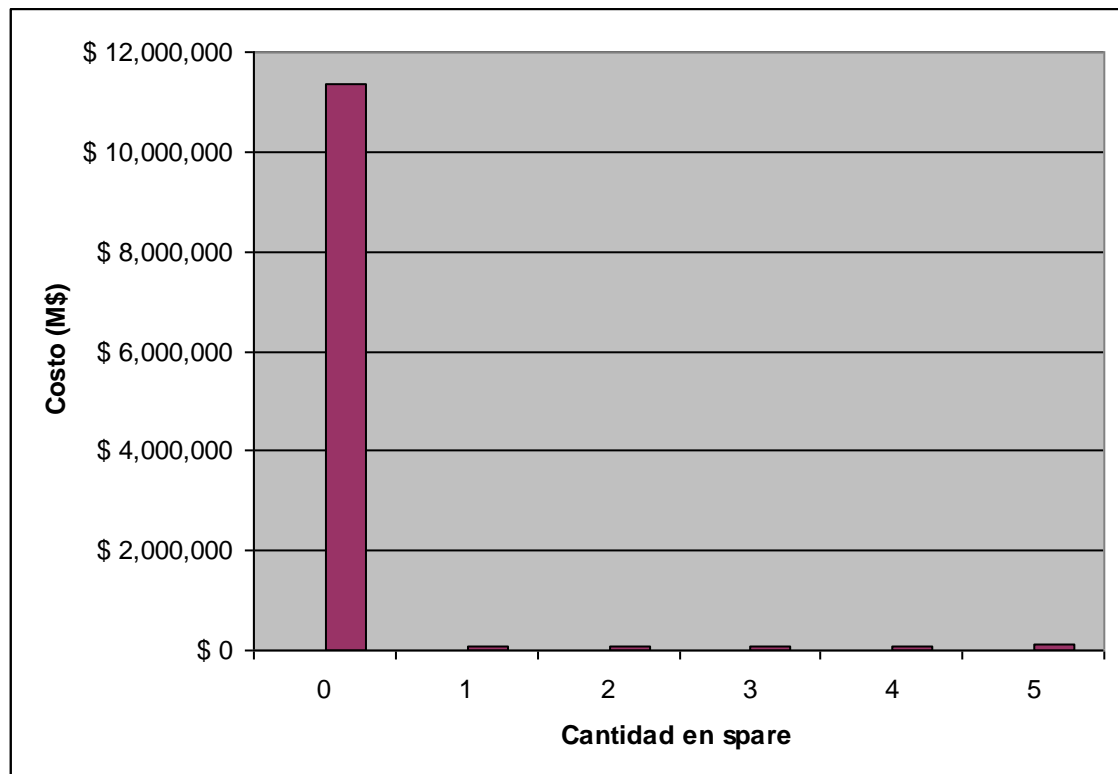
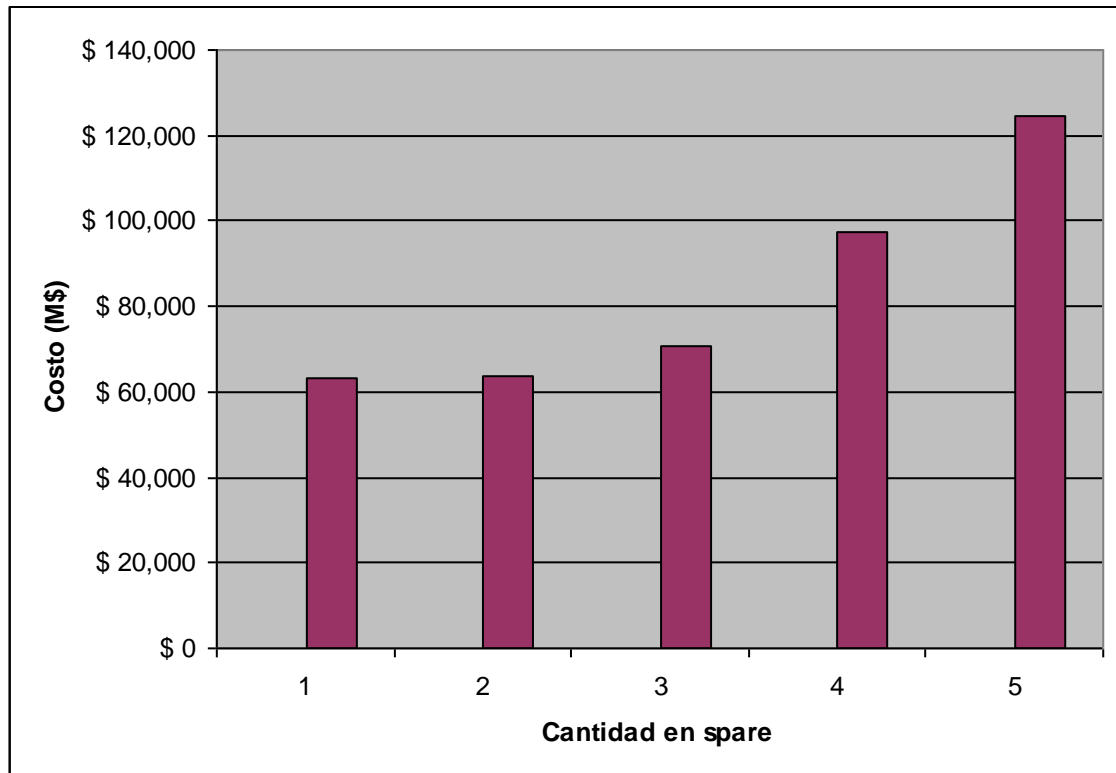


Figura No. 16. Costos totales de operación del sistema por unidades de repuesto en spare cuando la cantidad en spare varía entre 1 y 5.



De los resultados también se puede inferir que por ningún motivo se debe permitir que el inventario en spare llegue a cero, ya que el riesgo que se correría por indisponibilidad tendría unas consecuencias muy severas para la compañía.

Por otra parte, realizando una comparación entre los resultados obtenidos con el modelo propuesto y el método del tamaño económico de lote (EOQ), se obtiene lo siguiente:

- Demanda anual: los reportes de salidas del almacén del repuesto indican que la demanda promedio por año de este es de 0.75 unidades.
- El costo de almacenamiento por repuesto al año es \$41.667.
- El costo aproximado del pedido es de \$40.000.
- El tiempo de reabastecimiento es de 60 días

Teniendo en cuenta la expresión para el cálculo de la cantidad óptima a ordenar, se obtiene lo siguiente:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \times 0.75 \times 40000}{41667}} = 1.2 \text{ unidades}$$

El punto de reorden sería el siguiente:

$$R = \frac{0.75 \times 60}{365} = 0.123 \text{ unidades}$$

En este caso se debe tomar la decisión de trabajar con unas políticas con un punto de reorden en cero y con una cantidad a pedir de uno, o con un punto de reorden en uno y una cantidad a pedir en 2. Si se opta por la segunda opción, los valores se acercarán a los resultados ofrecidos por el modelo, ya que se mantendría una unidad en spare, mientras que si se opta por la primera, se correría el riesgo de no mantener en spare ninguna unidad, con los costos mostrados en los resultados mostrados anteriormente.

Dado que este mismo repuesto se utiliza en otros tres equipos en el complejo industrial, la optimización de la cantidad a mantener en spare se debe realizar basada en esta intercambiabilidad. Es decir, se debe tener en cuenta la demanda del repuesto de cada uno de los equipos por cada año de servicio de estos.

Con esta información se procede a calcular una tasa de fallas del equipo por año.

Con esta tasa de fallas por año, se estiman las probabilidades correspondientes: de encontrar y de no encontrar el repuesto, dado que se mantienen n unidades en spare. Estas probabilidades se calculan con la distribución de Poisson.

Para estimar la probabilidad de no encontrar un repuesto, se deben tener en cuenta dos parámetros adicionales: el tiempo de reabastecimiento del repuesto y el costo de no producción o penalización por indisponibilidad del repuesto. Este último presenta una variación con relación al valor anterior (USD 4.200) ya que los equipos están instalados en una línea de producción diferente a la considerada anteriormente.

Los datos restantes siguen siendo los mismos al problema inicialmente planteado, exceptuando la tasa de fallas, la cual es de 0.333 fallas por año para los tres equipos en mención, de acuerdo a la demanda de repuestos encontrada.

En la tabla No. 9 se muestran los resultados para la estimación del riesgo de mantener 0, 1, 2,..., 5 repuestos en spare, dado que se encuentra al menos una unidad del repuesto.

Tabla No. 9. Costos estimados por mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 repuestos en spare, dado que se encuentra al menos una unidad del repuesto.

Cantidad spare	Probabilidad de encontrar al menos 1 repuesto	Riesgo (\$/año)
0	0.7165	0
1	0.9553	10.031.438
2	0.9951	20.898.830
3	0.9996	31.487.570
4	0.9999	41.998.908
5	1	52.499.925

En la tabla No. 10 se muestran los resultados para la estimación del riesgo de mantener 0, 1, 2,..., 5 repuestos en spare, dado que no se encuentra por lo menos un repuesto.

Tabla No. 10. Costos estimados por mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 repuestos en spare, dado que no se encuentra al menos una unidad del repuesto

Cantidad spare	Probabilidad de encontrar al menos 1 repuesto	Riesgo (\$/año)
0	0.2834	117.167.058
1	0.0446	0
2	0.004	0
3	0.0003	0
4	0	0
5	0	0

Se debe tener en cuenta que cuando la cantidad de repuestos a mantener en spare es mayor que la demanda, el costo por indisponibilidad se hace cero para cada n evaluado.

En la tabla No. 11 se muestran los resultados totales para el caso planteado:

Tabla No. 11. Estimación del riesgo anual por mantener 0, 1, 2, 3, 4 y 5 repuestos en spare.

Cantidad spare	Probabilidad de encontrar al menos 1 repuesto	Riesgo (\$/año)
0	0.7165	117.167.058
1	0.9553	10.031.438
2	0.9951	20.898.830
3	0.9996	31.487.570
4	0.9999	41.998.908
5	1	52.499.925

Dados estos resultados, se concluye que el menor riesgo se obtiene cuando se mantiene una unidad en spare de este repuesto.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación realizada permite concluir lo siguiente:

- Es posible obtener políticas de inventario de repuestos a partir de la ingeniería de confiabilidad de equipos cuando se dispone de la suficiente información acerca de los modos de falla de estos.
- Es posible experimentar con los parámetros en los que se basó el modelo de optimización de repuestos.
- Las políticas de inventario óptimas obtenidas para el problema del sistema antibombeo del compresor de aire indican que se debe mantener una unidad en spare del repuesto utilizado y ordenar una unidad cuando se tenga una en inventario.
- Las políticas de inventario obtenidas por medio del modelo EOQ difieren de las que se obtienen con el modelo propuesto.
- El riesgo que se presenta con las políticas de inventario obtenidas en el modelo EOQ es mayor al que se obtiene con el modelo propuesto, el cual lo minimiza.
- El modelo propuesto permite optimizar la utilización de los repuestos asociados a los modos de falla del compresor de aire.

Además, trabajos futuros deben considerar:

- Diseñar un modelo que tenga en cuenta los mantenimientos preventivos realizados al equipo y observar como se afecta el riesgo y las correspondientes políticas de inventario de los repuestos asociados.
- Diseñar un modelo en el cual el tiempo de reabastecimiento siga una distribución o que sea aleatorio y verificar el efecto que esta variación tenga sobre los resultados.
- Considerar modelos de falla genéricos determinados por estudios de mantenimiento centrado en confiabilidad, especialmente para equipos críticos rotativos, para el establecimiento de políticas de inventario de repuestos.
- Por último, se recomienda ampliar este tipo de estudios a los equipos críticos de una planta de producción, con el fin de optimizar el valor del inventario de sus repuestos y minimizar el riesgo por indisponibilidad de estos.

REFERENCIAS

- [1] W. Li y M. Zuo, "Joint Optimization of Inventory Control and Maintenance Policy," presentado en el Simposio de Confiabilidad y Mantenibilidad 2007, Orlando, FL, Enero 22-25.
- [2] W. Wessels, "Use of the Weibull versus Exponential to Model Part Reliability," presentado en el Simposio de Confiabilidad y Mantenibilidad 2007, Orlando, FL, Enero 22-25.
- [3] A. Dubi "The Monte Carlo Method and Optimization of Spare Parts in Complex Realistic Scenarios," presentado en el Simposio de Confiabilidad y Mantenibilidad 2006, Newport Beach, CA, Enero 23-26.
- [4] A. Jodejko, "Model Of System Availability Caused by Spare Parts Inventory Level", en *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 46, No. 1, World Scientific Publishing Company, 2006, pp. 37-45.
- [5] L. Wang y Y. Zeng, "The Criticality of Spare Parts Evaluating Model Using Artificial Neural Network Approach", en *Computational Science – ICCS 2006*, Ed. Heidelberg. Springer Berlin, 2006.
- [6] A. Chelbi y N. Rezg "Analysis of a Production / inventory system with randomly mailing production unit subjected to a minimum required availability level", en *Journal of Production Economics*, Vol. 99, Issues 1-2, 2006, pp. 131-143.
- [7], Ghodrati, Akersten y Kumar "Spare Parts Estimation and Risk Assessment conducted at Chogart Iron Mine: A Case of Study", en *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13, Issue 4, 2007, pp. 353-363.
- [8] S. Panda. "Optimal JIT Safety Stock and Buffer Inventory for Minimal Repair and Regular Preventive Maintenance", en *International Journal of Operational Research 2007*, Vol. 2, No.4, pp. 440 - 451.
- [9] T. Sas, S. Sarkar. "Optimal Preventive Maintenance in a Production Inventory System", en *IIE Transactions 1999*, 31, 537 - 551
- [10] A. Fabregas, R. Wadnipar, C. Paternina y A. Mancilla. "Simulación de Sistemas Productivos con Arena". Ed. Uninorte.
- [11], M. Douglas C. "Diseño y Análisis de Experimentos," Ed. Iberoamérica. 2da Edición en Español, 1991.

ANEXOS

Anexo No. 1: Análisis de modos de falla y efectos del sistema antibombeo del compresor de aire.

Anexo No. 2: Historial de fallas del compresor de aire desde 1996 hasta el 2007.