

17

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---



FACULTAD DE INGENIERIA

MEJORA DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA EN  
INSTALACIONES DE MANUFACTURA

2935/01

T E S I S  
Que para obtener el título de  
INGENIERO MECANICO

presenta

RONNIE ALLAN WEITZNER BEHAR

DIRECTOR: ARTURO I. PEON ZAPATA



MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

**A MI MAMÁ, QUE SIEMPRE HA PUESTO TODO DE SU PARTE PARA QUE  
CONTINÚE ESTUDIANDO**

**A EDYE Y A LILIANA, POR TODO SU APOYO**

## **AGRADECIMIENTO**

**AI M.I. ARTURO I. PEÓN ZAPATA, POR SU APRECIADA DIRECCIÓN DURANTE LA ELABORACIÓN DE ESTA TESIS Y ORIENTACIÓN DURANTE ESTOS ÚLTIMOS AÑOS**

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. PRÓLOGO</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2. INTRODUCCIÓN</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1. La necesidad de mejorar la efectividad de activos                      | 7         |
| 2.2. Mejora de la Capacidad Productiva                                      | 8         |
| 2.3. Utilización de un algoritmo de mejora                                  | 9         |
| 2.4. La importancia de una métrica  | 10        |
| <b>3. EFICIENCIA TOTAL DEL EQUIPO (OEE)</b>                                 | <b>11</b> |
| 3.1. La Métrica   | 11        |
| 3.2. Las Pérdidas   | 11        |
| 3.3. Los Cálculos   | 13        |
| 3.4. Aumentando la Capacidad Productiva                                     | 14        |
| <b>4. PAROS NO PROGRAMADOS</b>  | <b>16</b> |
| 4.1. Probabilidad de Falla  | 17        |
| 4.2. Patrones de Falla  | 21        |
| 4.3. Determinando el Plan Apropriado de Mantenimiento                       | 25        |
| 4.4. Mantenimiento Productivo Total (TPM)                                   | 37        |
| 4.5. Eliminando las Fallas  | 40        |
| <b>5. PAROS PROGRAMADOS</b>   | <b>43</b> |
| 5.1. Redes  | 43        |
| 5.2. Dependencias Necesarias e Innecesarias                                 | 45        |
| 5.3. Identificando la Ruta Crítica  | 45        |
| 5.4. Enfoque Económico para Reducir la Duración del Paro                    | 46        |
| 5.5. Probabilidad de Finalizar Antes de una Cierta Fecha un Proyecto (PERT) | 49        |
| 5.6. Cadena Crítica   | 52        |
| 5.7. Administrando el Paro  | 54        |
| <b>6. PAROS POR TRANSICIONES</b>  | <b>59</b> |
| 6.1. Operaciones Internas y externas  | 59        |
| 6.2. Documentar los Detalles de un Proceso de Transición                    | 60        |
| 6.3. Identificar y separar operaciones internas y externas                  | 60        |
| 6.4. Remover Operaciones y Actividades Externas                             | 60        |
| 6.5. Convertir operaciones internas en externas                             | 61        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>7. CONCLUSIONES</b>   | <b>64</b> |
| <b>8. APÉNDICE A) DETERMINANDO EL PLAN APROPIADO DE MANTENIMIENTO</b>                                | <b>67</b> |
| <b>9. APÉNDICE B) RUTA CRÍTICA ÓPTIMA: RESULTADOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL MEDIANTE EXCEL: SOLVER®</b> | <b>69</b> |
| <b>10. APÉNDICE C) EFECTOS DE LAS FALLAS Y TÉCNICAS PARA DETECTARLAS</b>                             | <b>70</b> |
| <b>10.1. Efectos Dinámicos</b>   | <b>70</b> |
| <b>10.2. Efectos por Agentes Externos</b>  | <b>70</b> |
| <b>10.3. Efectos Térmicos</b>  | <b>71</b> |
| <b>10.4. Efectos Físicos</b>   | <b>71</b> |
| <b>11. BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>72</b> |

## 1. PRÓLOGO

Esta tesis se ha redactado con el objetivo de compartir una serie de conocimientos adquiridos durante la estancia en una empresa, que al aplicarlos ha ayudado a mejorar la capacidad productiva de sus instalaciones de manufactura como se podrá ver en las conclusiones de esta tesis. Podrá servir como guía para cualquier empresa que cuente con instalaciones de manufactura y esté interesada en mantenerse competitiva en un mercado cada vez más globalizado.

Estos conceptos se pueden aplicar en cualquier instalación manufacturera que se comprometa con la mejora continua así como a trabajar para consolidar resultados a corto como a largo plazo, comenzando por calcular su eficiencia y continuando al enfocar los esfuerzos para reducir las pérdidas que más repercutan a la empresa.

La tesis, a grandes rasgos expone la manera en que se mide la capacidad productiva de las instalaciones de manufactura y expresa una serie de metodologías que ayudan a una empresa a reducir uno de los tres tipos de pérdidas que se mencionan más adelante en el Capítulo 3.

El tipo de pérdida que se estudia aquí es el relacionado con los paros, que puede clasificarse en paros programados, paros no programados y paros por transiciones.

Los paros programados, como son algunas tareas de mantenimiento preventivo, son aquellos que hasta cierto punto tenemos bajo nuestro control y al ser así, debemos encontrar maneras para mantener la planta detenida el menor tiempo posible.

Los paros por transiciones, como son los cambios de molde en una máquina de inyección, si se quieren ver de una manera estricta, podrían caer dentro de la categoría de los paros programados, es por eso que varias estrategias utilizadas para reducir el tiempo de los paros programados también pueden aplicarse al de las transiciones, pero existen metodologías específicas para tratar con estas últimas.

Por último, los paros no programados, como son las descomposturas de alguna máquina, son aquellos que ocurren de forma inesperada por lo que conllevan un alto impacto a la economía de la empresa. Es por eso que se quieren anticipar, para que el impacto sea el menor posible. Bajo este esquema se encuentran sumergidas la mayoría de las empresas de nuestro país.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. LA NECESIDAD DE MEJORAR LA EFECTIVIDAD DE ACTIVOS

Con la apertura de los mercados mundiales, la mejora de la comunicación e interacción instantánea mundial mediante las redes computacionales, así como la posibilidad de que todos podamos acceder a las tecnologías avanzadas, más y más compañías han tenido que competir con empresas alrededor de todo el mundo para poder vender sus productos. El precio de los productos que produce cualquier compañía tiene que ser competitivo, esto es, por lo menos al mismo nivel de precios que los de la competencia en cualquier parte del mundo.

Al hablar de instalaciones de manufactura esta competitividad en precios y calidad está íntimamente relacionada con lo que se llama la Efectividad de Activos. Con este término queremos entender el enfoque moderno de mejorar el rendimiento de una inversión en la forma que lo ilustra la figura 1.

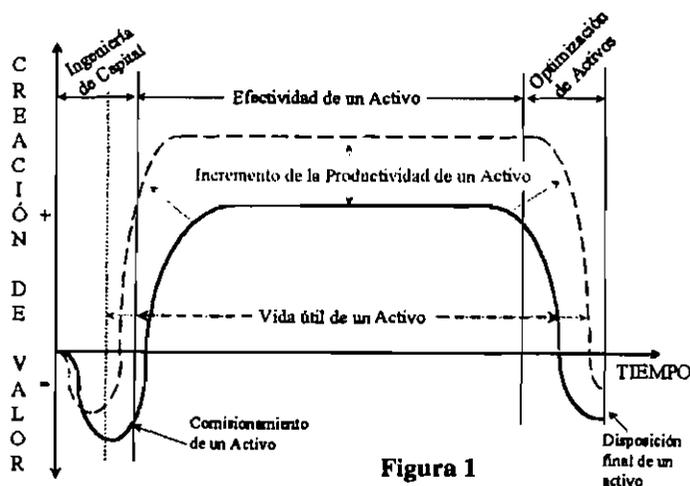


Figura 1

Esta figura la hemos dividido en las siguientes partes:

- La primera se refiere al periodo de inversión, las políticas relacionadas con la efectividad de activos, durante este periodo tiene que ver con estrategias que minimicen la inversión, construyan más rápido las instalaciones y que empleen la mejor tecnología productiva. Esto quiere decir en pocas palabras que es necesario disminuir la

inversión, disminuir el tiempo de implementación, hacerlo más productivo y alargar la vida útil del proyecto.

- El segundo periodo se refiere a las estrategias que buscan que la combinación hombre, máquina y sistemas opere al máximo de su capacidad y con el mínimo de defectos. Esto es lo que llamamos aumento de la capacidad productiva, y que es el tema principal de esta tesis.
- El tercer periodo es aquel que busca extender la vida útil de las instalaciones manufactureras. De alguna manera las estrategias relacionadas con el aumento de capacidad productiva tienen consecuencias en el aumento de la vida de las instalaciones ya que estas estrategias con frecuencia están relacionadas con formas de reducir los costos a lo largo del ciclo de vida de una instalación. Una forma natural de reducir los costos del ciclo de vida es aumentar la vida útil.

## **2.2. MEJORA DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA**

Para que los negocios permanezcan competitivos, los equipos deberán estar disponibles cuando se necesiten y las instalaciones de manufactura deberán acoplarse a la demanda para operar a su máxima eficiencia para la demanda establecida. En este clima existe poco margen de error al diseñar, operar y mantener los equipos de producción. Los equipos deberán ser diseñados para ser durables y requerir el mínimo de servicios, los materiales deben ser de la más alta calidad, los equipos deben estar disponibles cuando se requiera y los procesos deberán operar a sus más altas capacidades de diseño.

Sin embargo en la vida real existen infinidad de factores que afectan la producción. De hecho es en la planta de manufactura donde impactan todos los factores que disminuyen o afectan a la producción, defectos o errores como los que se ilustran a continuación:

- Departamento de ventas: Compromisos de producir partes y productos para las cuales las instalaciones originalmente no fueron diseñadas. Errores en los códigos, cantidades, especificaciones, fechas de entrega o destino del producto.
- Control de la Producción: Errores de comunicación con el departamento de ventas resultan en planes de producción y pronósticos erróneos.
- Departamento de compras: Falta de materia prima o materiales fuera de especificaciones.
- Departamento de embarques: Cantidad equivocada de producto embarcado.
- Departamento de diseño del producto: Diseño de productos carentes de facilidad para la manufactura.
- Departamento o gerencia de ingeniería: Errores en el diseño que selecciona equipo que no siempre opera en un medio ambiente que respete la intención original del diseño, o con gente que entienda los requerimientos del fabricante para operar el equipo especialmente al arranque de las instalaciones.
- Departamento de mantenimiento: Uso de refacciones inadecuadas o armado incorrecto.

A final de cuentas podemos clasificar todos estos errores o defectos en diferentes formas: Transaccionales o de equipo, causados por otros departamentos o por personal de operación y mantenimiento. Desde un punto de vista técnico, que es el motivo de esta tesis, podemos clasificarlos en fallas que hacen que el equipo pierda total o parcialmente su función productiva (paros totales, paros menores, reducciones de velocidad, etc.) o defectos que la maquinaria le produce al producto afectando su calidad, resultando en producto fuera de especificaciones.

Estas fallas pueden ser evidentes o pueden estar escondidas. A veces son producto de una sola causa, de múltiples causas independientes, o de múltiples causas interrelacionadas. Las más de las veces solemos también clasificarlas en fallas esporádicas o crónicas, clasificación que habla de que tanto nos percatamos de ellas, como en las fallas esporádicas

que nos fuerzan a actuar rápidamente por la magnitud de su impacto o en fallas crónicas con las que aprendemos a convivir, frecuentemente no las vemos, reduciendo de esta manera los niveles de producción y calidad, producto de múltiples causas interrelacionadas que sin sentir nos han llevado a pensar en estas pérdidas como normales y aceptables en el proceso productivo.

En otra dimensión, estas fallas pueden afectar a la tasa de producción (capacidad productiva) o pueden fallar en el tiempo. A final de cuentas la capacidad productiva queda afectada por las probabilidades de falla en el tiempo de una multitud de piezas y equipos alineados de modo que las causas de las reducciones de producción y de calidad quedan escondidas y enmascaradas por multitudes de efectos cascareados en complejidad de la multitud de defectos que inundan los procesos productivos.

Durante años hemos reaccionado a las fallas en los procesos y equipos, en lugar de anticiparlos y prevenirlos. Hoy en día, las condiciones del mercado han cambiado, y no nos podemos arriesgar a seguir practicando manufactura y mantenimiento reactivo. La competencia es feroz; la completa utilización de nuestros activos es crítica. Centavos por kilo representan la diferencia entre la ganancia y la pérdida, y cada hora de producción perdida nos inhabilita a responder a las demandas de los clientes. ¿Pero cómo dentro de esta multitud de defectos localizar los más importantes para iniciar una mejora en términos proactivos?

### **2.3. UTILIZACIÓN DE UN ALGORITMO DE MEJORA**

En general un algoritmo de mejora sería:

1. Poner una instalación a producir al máximo. Esto se lleva a cabo con el interés de saber cual es nuestra capacidad productiva actual y resaltar las restricciones de nuestro proceso.
2. Identificar las restricciones. Identificar los defectos y las causas raíces que contribuyen a las restricciones con el fin de que nos permita enfocarnos al problema real por el cual no podemos aumentar nuestra capacidad de producción.
3. Alinear las operaciones para mejorar la productividad de la restricción. Para tener éxito, todo deberá ser unificado para trabajar alrededor de un fin común, alineados a una meta común, que en este caso es mejorar la productividad de la restricción identificada anteriormente.
4. Eliminar la restricción. Si es posible debe desarrollarse un plan de acción para eliminar la restricción, esto puede lograrse a través de añadir mayor capacidad, cambiar el diseño, o emplear técnicas para eliminar las pérdidas.
5. Regresar a aumentar la capacidad de producción y detectar la siguiente restricción. Se deberá sostener los resultados obtenidos y aumentar de nuevo la capacidad de

producción al máximo, logrando con esto cerrar el ciclo en la búsqueda de llegar a niveles más altos de excelencia en manufactura.

## **2.4. LA IMPORTANCIA DE UNA MÉTRICA<sup>1</sup>**

El algoritmo anterior está muy bien, y tiene muchas ventajas. Al igual que en los algoritmos de programación lineal, encontramos que el capital invertido en eliminar una restricción es el que tiene la mejor rentabilidad marginal. La dificultad del algoritmo anterior radica en encontrar un método o forma de identificar o detectar la(s) restricciones y su importancia relativa.

Un primer paso obligado es el de tener un pleno entendimiento de los procesos de manufactura. El método para mejorar la capacidad productiva que abordaremos es el empleo de técnicas para reducir las pérdidas de producción basados en una métrica denominada “Eficiencia Total de los Equipos” que suministra un marco de referencia para recolectar y analizar la información operativa y hacer evidentes las pérdidas productivas, mismas que son la versión tangible de las restricciones del binomio de producción dado por el personal de operación y las máquinas del proceso productivo.

Mediante la identificación de los defectos y las pérdidas de producción, y su sistemático estudio y eliminación de sus causas, un negocio puede:

- Reducir costos.
- Mejorar la calidad.
- Reducir el capital de trabajo.
- Reducir el consumo de energía y de materia prima.
- Mejorar la capacidad de respuesta al cliente.
- Incrementar las ganancias.
- Reducir el impacto ecológico.

Es pues el tema de esta tesis el de la eliminación de estos defectos a partir de la base que suministra la “Eficiencia Total de los Equipos” (OEE) como una métrica que provee uniformidad en la medición del impacto de una variedad de pérdidas de producción, como lo son los paros programados, los paros no programados, la reducción de velocidad de proceso y la no-conformidad con la calidad.

---

<sup>1</sup> La palabra “métrica” la usamos para definir una forma de medición.

### **3. EFICIENCIA TOTAL DEL EQUIPO (OEE)**

#### **3.1. LA MÉTRICA**

OEE son las siglas en inglés que abrevian “Overall Equipment Efficiency”, que traducido al español quiere decir algo así como “Eficiencia Total de los Equipos” y es la métrica que utilizaremos para medir nuestra capacidad productiva e identificar las pérdidas en nuestro proceso. Esta métrica toma en cuenta todas las pérdidas relacionados con la manufactura.

Recopilando información y analizándola podemos mejorar continuamente la eficiencia de las instalaciones y así ayudar a un negocio a eficientizar el potencial que tiene con los activos existentes.

Si queremos calcular una métrica confiable, tendremos que prestar atención a dos factores importantes. Primero, contar con registros confiables y precisos de operación de los equipos en las instalaciones de manufactura; y segundo, idear escalas precisas para medir las condiciones de operación de los equipos.

#### **3.2. LAS PÉRDIDAS**

Antes de profundizar en el cálculo de OEE, debemos conocer los diferentes tipos de pérdidas. Es importante que todas las pérdidas sean registradas en algún tipo de pérdida definida y no formar categorías como son los “misceláneos” u “otros”, ya que estos no agregan ningún valor para el proceso de reducción de pérdidas.

Podemos diferenciar a las pérdidas en tres grandes tipos, pérdidas por paros, pérdidas por velocidad y pérdidas por no-conformidad con la calidad.

##### **3.2.1. Pérdidas por Paros**

Estas pérdidas son consideradas cuando la línea de producción se encuentra detenida por completo. Podemos subdividir ese tipo de pérdida en tres:

###### **a) Paros Programados:**

Los paros programados son pérdidas en las que la planta se detiene para realizar actividades predeterminadas y planeadas, como lo son todas las actividades del mantenimiento programado, cambios de diseño, paros mayores de mantenimiento, etc. Lo importante de esta categoría es que es el proceso de planeación el que puede escoger el mejor momento para parar la máquina y poder realizar las tareas de paro con eficiencia y efectividad.

#### b) Paros por Transiciones:

Los paros por transiciones son pérdidas por paros programados que tienen como propósito el cambio entre un producto y otro. Normalmente caen en esta categoría los paros por cambio de producto que requieren una limpieza de la maquinaria. En la industria metalmeccánica es clásico el tener que parar para cambiar herramientas y troqueles en las troqueladoras o dados en los procesos de extrusión.

#### c) Paros No Programados:

Los paros no programados son pérdidas en las que la planta se detiene debido a eventos esporádicos y no controlados como lo son cualquier falla en los equipos que afecten la producción. De su falta de control y predicción es la magnitud de su afectación, dado que esto suele ser sorpresivo, y como tal, implica que los mecanismos de falla no son conocidos y mucho menos controlados apropiadamente por acciones de mantenimiento. Son múltiples las causas de estos paros: las máquinas o el proceso no siguen procedimientos que supuestamente indican la mejor forma de operar, operar fuera de especificaciones, falta de suministro de materia prima, negligencia en las reparaciones, o falta de calidad de ellas, o en ultima instancia debilidades del diseño. En algunos casos estos paros no programados se subdividen en paros pequeños o mayores, dado que las metodologías necesarias para resolverlos son esencialmente diferentes, tan diferentes como su impacto. En los paros pequeños su impacto suele ser en el proceso, lo que hace difícil la estabilización operativa de las máquinas automáticas.

### **3.2.2. Pérdidas por Reducción de Velocidad**

Estas pérdidas son consideradas cuando la línea de producción no se detiene por completo pero si reduce su velocidad de producción respecto al ciclo esperado. Podemos subdividir este tipo de pérdida en dos:

#### a) Marcha Intermitente:

Son pérdidas causadas por reducciones en la velocidad que no son percibidas, por lo que no son registradas como tal, ya que suceden en lapsos muy cortos o en ajustes pequeños durante el proceso.

#### b) Reducción de Velocidad:

Son pérdidas causadas por reducciones en la velocidad que si se pueden registrar, pueden ser por voluntad propia del operador, catalizadores saturados, aumento de temperatura del aire, depósitos en las tuberías, etc. En otras ocasiones se debe a que los procesos químicos no están bien controlados, producen tapones, congelamiento de válvulas, polimerizaciones de productos, sedimentos y deshechos que impiden la marcha completa del proceso o producción.

### 3.2.3. Pérdidas por No-Conformidad con la Calidad

Estas pérdidas son consideradas cuando una cierta cantidad de producto se produce y no cumple con los estándares de calidad. Se considera como pérdida ya que la línea desperdicia tiempo para producir productos que no van a servir en lugar de producir productos de primera calidad.

## 3.3. LOS CÁLCULOS

El porcentaje de OEE se calcula matemáticamente como el producto entre la disponibilidad, el desempeño y la fracción de calidad.

$$\% \text{ O.E.E.} = \text{Disponibilidad} \times \text{Desempeño} \times \text{Fracción de Calidad} \times 100$$

### 3.3.1. Disponibilidad

Es la razón de tiempo que la línea de producción en realidad se encuentra operando (TO) con respecto al Tiempo Programado (TP) que se pretende que esté operando.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{TO}{TP} \quad \dots 1$$

Se define al Tiempo Programado (TP), como el Tiempo Calendario (TC, todos y cada uno de los minutos del reloj) menos el Tiempo Excluido (TE, no se tiene programado producir ningún producto como el caso de la no demanda, los días no laborales y la producción experimental).

$$TP = TC - TE \quad \dots 2$$

También se define el Tiempo de Operación (TO), como el Tiempo Programado (TP) menos los Paros Programados (PP) y los Paros No Programados (PNP).

$$TO = TP - PP - PNP \quad \dots 3$$

Si sustituimos las ecuaciones 2 y 3 en 1, tenemos que la disponibilidad es:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{TP - PP - PNP}{TP} = \frac{(TC - TE) - PP - PNP}{(TC - TE)}$$

### 3.3.2. Desempeño

Es la razón de la Tasa de Producción Real (TPR) en Unidades Producidas reales (UP) por Tiempo de Operación (TO) respecto a la Tasa de producción Esperada (TPE).

$$\text{Desempeño} = \frac{TPR}{TPE} = \frac{UP}{TO \times TPE}$$

### 3.3.3. Fracción de Calidad

Es la razón de Unidades Producidas conforme a los estándares de Calidad (UPC) respecto al total de Unidades Producidas (UP), siendo (UD) las Unidades Disconformes.

$$\text{Fracción de Calidad} = \frac{UPC}{UP} = \frac{UP - UD}{UP}$$

## 3.4. AUMENTANDO LA CAPACIDAD PRODUCTIVA

La capacidad productiva la definimos como sigue:

$$\text{Capacidad Productiva} = OEE \times TPE \text{ [unidades producidas / tiempo]}$$

El objetivo de nuestro algoritmo de mejora y del análisis de la métrica de OEE es ayudar a crecer la capacidad productiva de los activos existentes. Si un negocio no conoce su OEE y su tasa de producción esperada para cada tipo de producto, éste no podrá calcular su capacidad productiva.

Cualquier mejora en el OEE o la tasa de producción esperada, resulta en un incremento de la capacidad productiva como lo muestra la figura 2. La tasa de producción esperada puede ser mejorada a través de nuevas tecnologías, eliminación de cuellos de botella, mejoras del control de procesos y aumento de velocidad de proceso.

OEE puede ser mejorado mediante el incremento de la eficiencia del proceso, minimizando

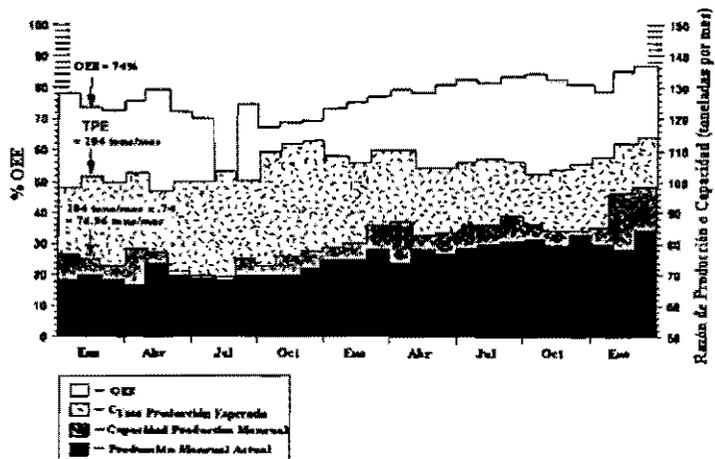


Figura 2

los paros programados, mejorando la calidad del producto, previniendo paros no programados, y reduciendo los tiempos de transición.

### 3.4.1. La Capacidad Productiva en Instalaciones de Manufactura con Unidades Múltiples

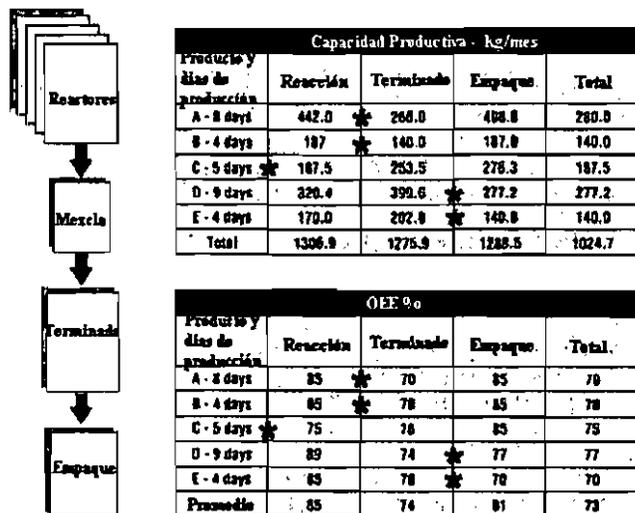


Figura 4

que puede dar o por que esta limitación se dé en el tiempo. Esto es debido a que una cadena productiva es tan robusta como su enlace más débil. Para cada producto, la capacidad productiva está dada por el mínimo productivo de dichos eslabones, y la capacidad productiva de la unidad completa estará dada por la suma de las capacidades productivas para cada producto multiplicado por los tiempos en que cada producto es manufacturado.

Cuando las unidades productivas están en serie, la capacidad productiva de todas las unidades queda definida por el cuello de botella, esto es, la capacidad de la unidad con menor capacidad productiva, como lo muestran las figuras 3 y 4. Esto es para cada producto. La capacidad productiva en este caso puede estar limitada por la tasa máxima de producción de la unidad límite, o por la confiabilidad de esta. Esto es, el límite esta dado ya sea por el máximo instantáneo de producción

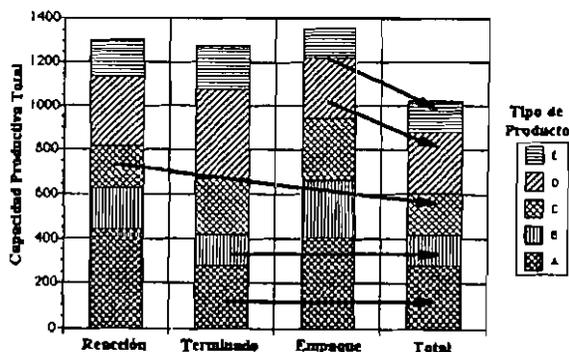


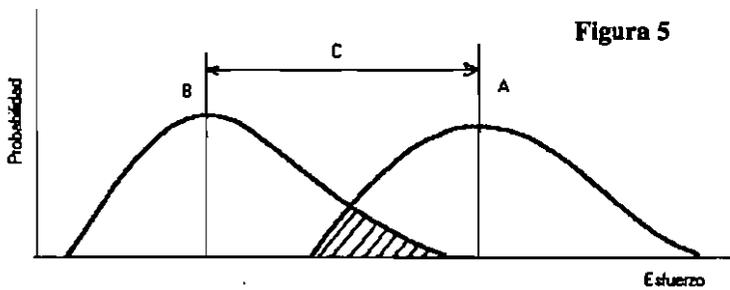
Figura 3

#### 4. PAROS NO PROGRAMADOS

Las pérdidas relacionadas con los paros no programados suelen manifestarse de diferentes formas, ya sea en averías y/o paros pequeños. Frecuentemente el impacto de los paros pequeños es mayor al de las averías. Un paro no programado significa que el equipo se detiene cuando quiere, lo que significa que no tenemos el control sobre él, ni sobre el medio ambiente que impactan en él.

Desde un punto de vista simple y elemental, la probabilidad de falla de un elemento de un equipo se puede ilustrar en la siguiente figura.

La curva A de la figura 5 muestra para una cierta variable, ya sea física, mecánica, eléctrica, etc.



la distribución de esfuerzo que puede soportar un componente. La curva B muestra la probabilidad de los esfuerzos a los que se someterá el componente en la realidad. La probabilidad de falla será la intersección del área bajo las dos curvas. Una

forma de mejorar la confiabilidad del equipo es obviamente aumentando la distancia c entre las dos curvas, lo que significa reducir la magnitud del esfuerzo aplicado o reforzar el elemento.

El diseñador del equipo o del sistema normalmente no conoce el trabajo real al que el equipo será sometido. Existen dos maneras de mejorar la confiabilidad intrínseca del equipo. La primera es aumentar la distancia entre las dos curvas, para reducir la probabilidad de encontrar un esfuerzo mayor al mínimo soportable por el equipo. En el segundo caso se puede reducir la desviación estándar de lo que la pieza resiste mediante un enfoque en la calidad del producto,

y por el otro también reducir la desviación estándar del esfuerzo al que estará sometido. Para ello, lo primero que se define es un medio ambiente (temperatura, humedad, presión, etc.) en el que se supone que se desempeñará el equipo así como una definición más estricta de la carga a la que se someterá el equipo. Una fuente de error frecuente se encuentra aquí, pues es una persona la que diseña el equipo, otra persona (ingeniería) la que

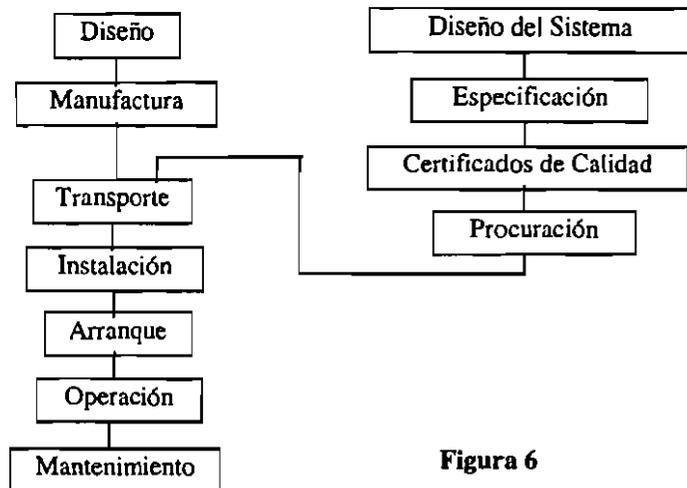


Figura 6

selecciona e integra el equipo en el sistema productivo, y una última persona la que opera, sin que haya procesos que garanticen que todas las condiciones implícitas se cumplan. Así pues, mejorar la confiabilidad, implica no sólo que tendremos que cuidar el equipo, sin asegurar que el equipo cumpla con los requerimientos durante cada uno de los pasos por los que pasa en su vida, como lo ilustra la figura 6.

#### 4.1. PROBABILIDAD DE FALLA

La probabilidad de que un componente continúe cumpliendo con las especificaciones en un determinado periodo de tiempo y sujeto a dadas condiciones ambientales se conoce como la confiabilidad (R) de un componente. Su complemento (F) es la probabilidad de que un componente falle en el mismo periodo de tiempo, como lo muestra la figura 7.

$$F(t) = 1 - R(t)$$

La frecuencia de falla promedio ( $\lambda$ ) es el número de fallas presentadas durante el tiempo total de servicio. La confiabilidad (R) de un componente puede relacionarse con su frecuencia promedio de falla ( $\lambda$ ) mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

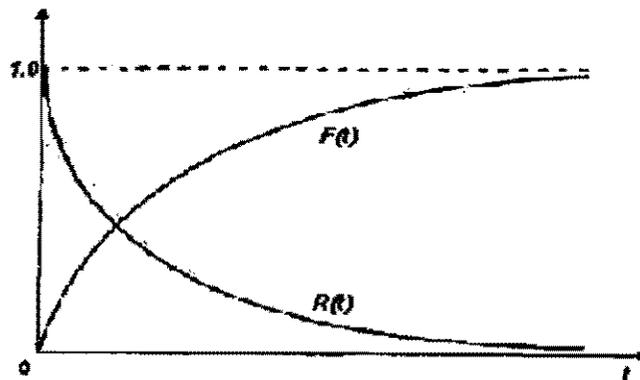


Figura 7

Si se considera una frecuencia de falla constante, la confiabilidad es:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Si se quiere considerar frecuencias de falla con diferentes comportamientos, se puede utilizar la distribución de Weibull. La frecuencia de falla instantánea para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} ; \beta > 0$$

siendo  $\beta$  el parámetro de forma,  $\eta$  el parámetro de escala y  $t_0$  el tiempo de origen ( $R(t_0)=1$ ), la figura 8 nos muestra diferentes comportamientos para ésta distribución.

Sustituyendo  $\tau = \frac{t-t_0}{\eta}$  en la ecuación y calculando la confiabilidad tenemos:

$$\eta\lambda(\tau) = \beta\tau^{\beta-1}$$

$$R(\tau) = e^{-\tau^\beta}$$

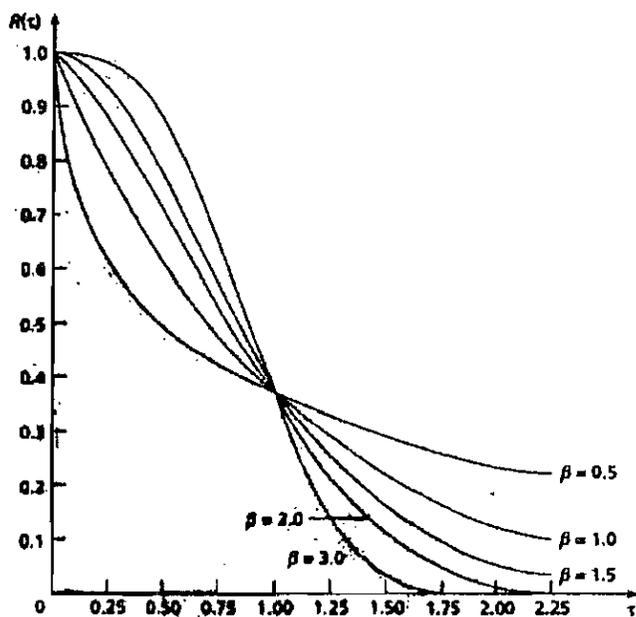
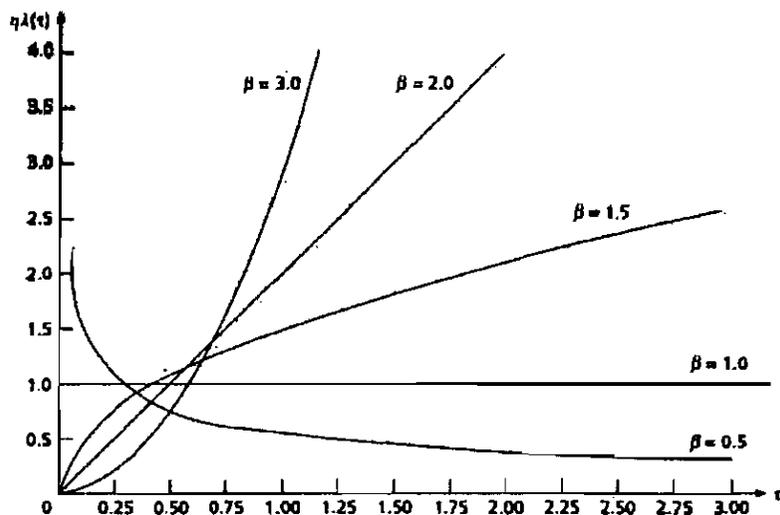


Figura 8

Cuando consideramos que los equipos son sistemas compuestos por varios componentes, podemos calcular la probabilidad de que estos sistemas fallen, utilizando la confiabilidad de los componentes que lo componen así como su configuración como lo muestran las figuras 9, 10, 11 y 12.

#### 4.1.1. Confiabilidad de Sistemas en Serie

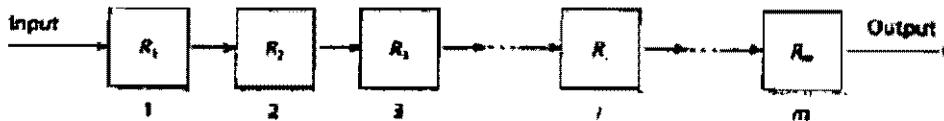
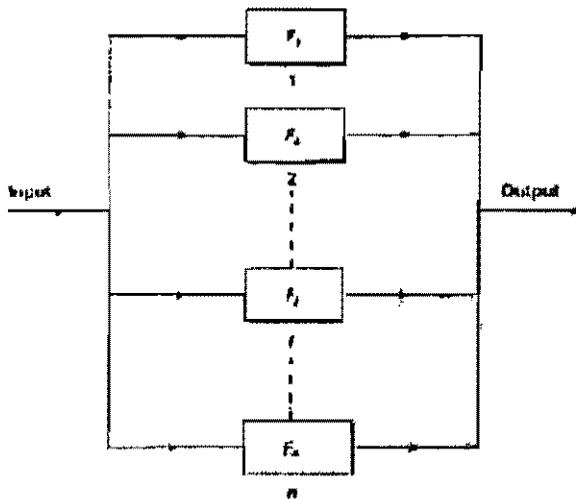


Figura 9

$$R_{\text{sist.}} = R_1 R_2 R_3 \dots R_m = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \dots e^{-\lambda_m t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m) t}$$

#### 4.1.2. Confiabilidad de Sistemas en Paralelo



$$\begin{aligned} F_{\text{sist.}} &= F_1 F_2 F_3 \dots F_n \\ &= (1 - R_1) (1 - R_2) \dots (1 - R_n) \\ &= (1 - e^{-\lambda_1 t}) (1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_n t}) \end{aligned}$$

Figura 10

#### 4.1.3. Confiabilidad de Sistemas en Paralelo (m de n)

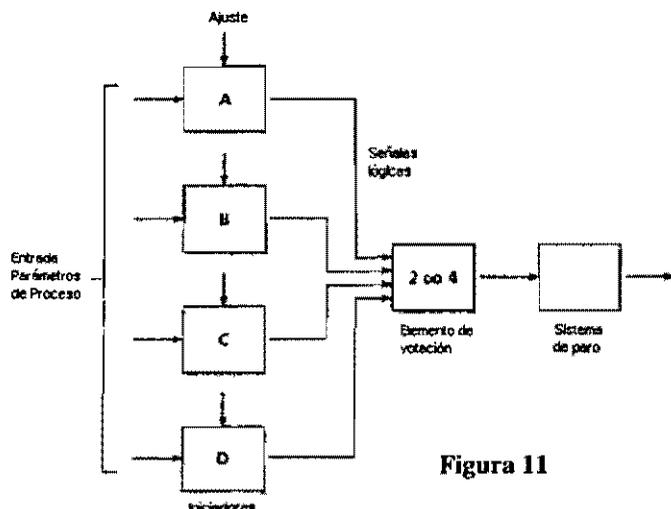


Figura 11

Cuando existe un sistema de \$n\$ componentes en paralelo con la misma confiabilidad para cada componente y para que el sistema funcione, requiere que \$m\$ componentes de \$n\$ estén funcionando (*voting systems*).

La figura 11 representa un sistema en paralelo (2 de 4).

En este tipo de sistemas la probabilidad de que continúe funcionando esta dada por:

$$R_{sist} = R(A, B, C \text{ y } D) + R(A, B \text{ y } C) + R(A, B \text{ y } D) + R(B, C \text{ y } D) + R(A, C \text{ y } D) + R(A \text{ y } B) + R(A \text{ y } C) + R(A \text{ y } D) + R(B \text{ y } C) + R(B \text{ y } D) + R(C \text{ y } D)$$

$$R_{sist} = R^4 + 4R^3F + 6R^2F^2$$

Se puede observar que si queremos que funcionen 2 de 4 elementos en paralelo, podemos tomar para la ecuación los 3 primeros términos de la expansión binomial.

$$(R + F)^4 = R^4 + 4R^3F + 6R^2F^2 + 4RF^3 + F^4$$

#### 4.1.4. Confiabilidad de Sistemas Redundantes

$$R_{sist} = e^{-\lambda t} \left[ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \right]$$

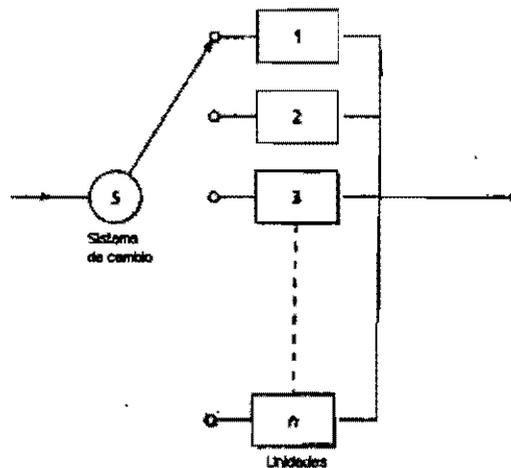


Figura 12

## 4.2. PATRONES DE FALLA

La probabilidad de falla de los equipos puede ser representada mediante distintos patrones de falla, ilustrados en la figura 13.

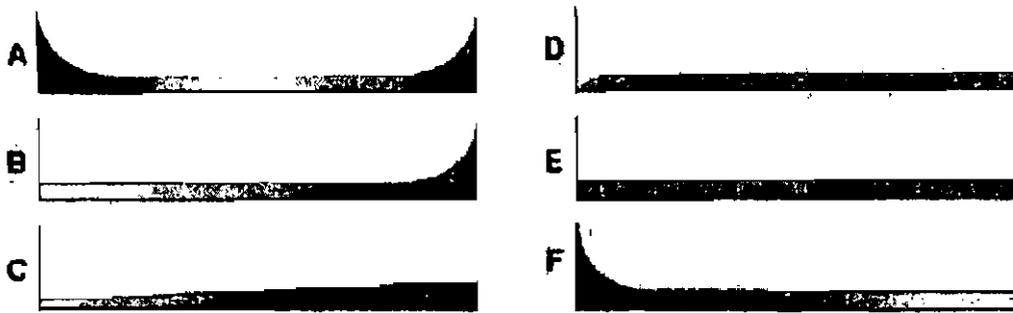


Figura 13

La FAA (Federal Aviation Association) de los Estados Unidos, preocupada porque no parecía haber correlación entre los accidentes de aviones y los mantenimientos totales o parciales dados a las aeronaves, realizó una serie de estudios dirigidos a entender esta relación. La conclusión indica que solo un pequeño número de componentes tiene una vida en el término que normalmente se entiende. Y estos componentes son mayormente los que están expuestos a una forma de desgaste dependiente del tiempo, los cuales quedan cubiertos bajo el patrón B de la figura anterior. Muchas otras partes o componentes tienen probabilidades de falla altas al empezar la vida útil del equipo. De modo que al parar un equipo para mantenimiento podemos eliminar fallas de componentes como bandas o ruedas de automóviles, al tiempo que podemos introducir al sistema más fallas del tipo de mortalidad infantil

Para el caso de la industria aeronáutica se mostró que el 4% de los componentes conformaban al patrón A, el 2% al B, el 5% al C, el 7% al D, el 14% al E y el 68% al F. Estos porcentajes pueden no coincidir por completo con otro tipo de industrias, pero se puede ver que al tomarse más complejos los equipos tenderemos más hacia estos porcentajes.

### 4.2.1. Patrón B

Este patrón de falla está íntimamente ligado a la edad o al desgaste ocasionado entre el producto y el equipo, y la mayoría de los componentes fallan alrededor de un periodo de tiempo. En este patrón se podrán hacer uso del historial de equipo y definir un tiempo medio entre fallas (MTBF) que sea útil para calcular la frecuencia de falla promedio. El tiempo medio entre fallas no podrá utilizarse para establecer la frecuencia de las tareas proactivas de mantenimiento, deberá utilizarse la vida útil para cumplir mejor con este propósito.

El tiempo medio entre fallas (MTBF) se define como el tiempo total de servicio (TTS) de todas las piezas del mismo tipo bajo consideración en una muestra entre el número de fallas (NF) presentadas en toda esta muestra.

$$MTBF = \frac{TTS}{NF}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

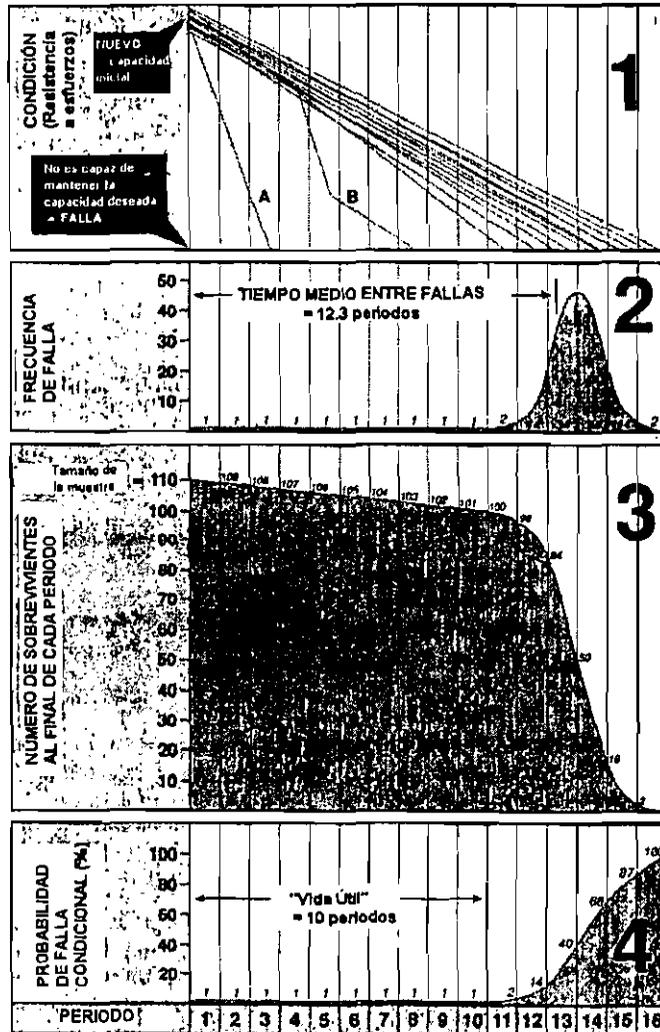


Figura 14

#### 4.2.2. Patrón E

Este patrón de falla representa fallas esporádicas, significa que la probabilidad de que un componente falle en un periodo de tiempo es la misma que en cualquier otro.

A pesar de que es imposible predecir cuanto durará un componente, se establece el tiempo medio entre fallas (MTBF) cuando 63% de los componentes han fallado. No se puede observar una vida útil por lo que no existe ningún parámetro para establecer la frecuencia de las tareas proactivas.

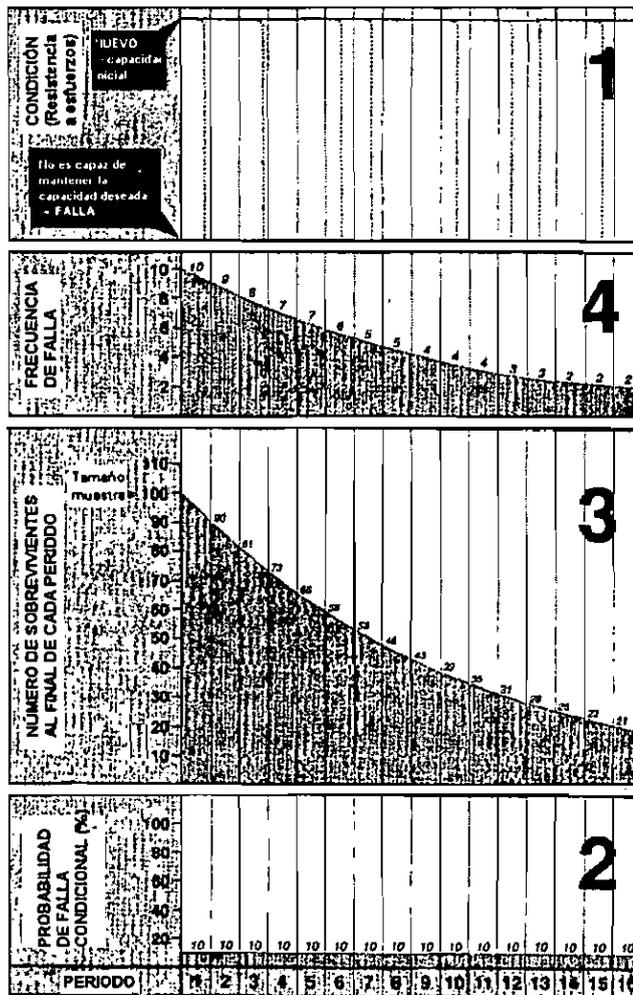


Figura 15

### 4.2.3. Patrón C

Este patrón de falla representa en algunos casos a la fatiga, las fallas por fatiga son debidas a esfuerzos cíclicos y la relación entre el esfuerzo cíclico y la falla depende de la curva S-N, como se muestra en la figura 16 y 17.

Se puede observar una vida útil donde incrementa rápidamente la probabilidad de falla, la cual se podrá hacer uso para establecer frecuencias de tareas proactivas.

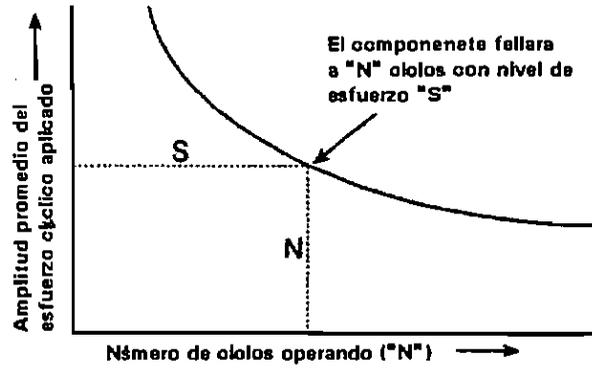


Figura 16

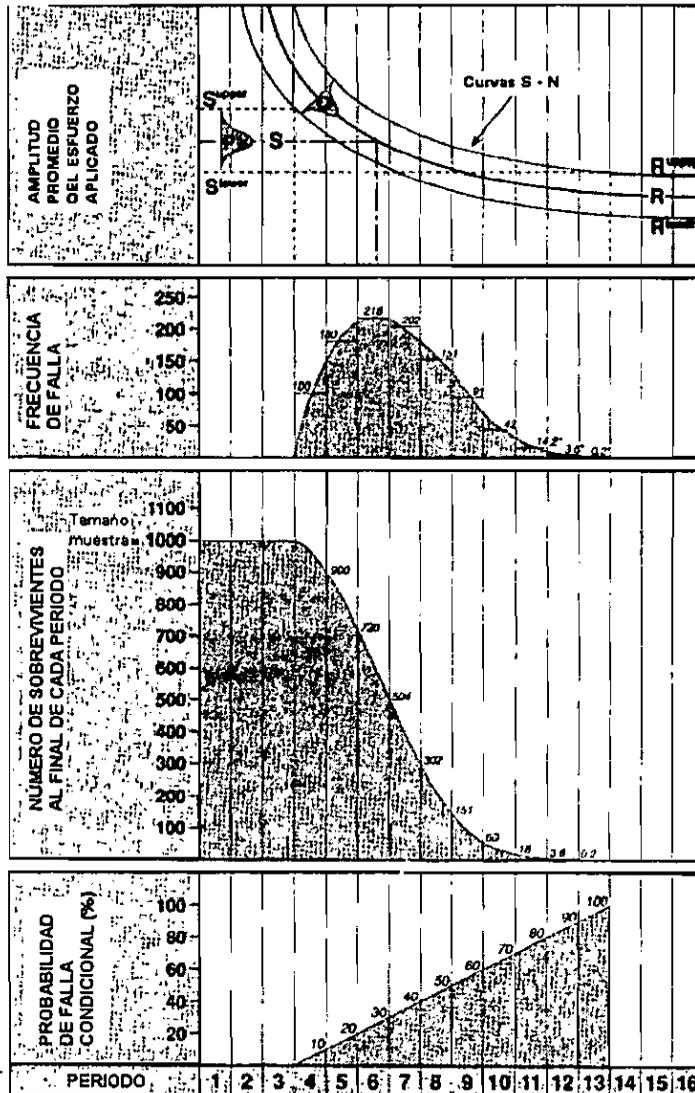


Figura 17

#### **4.2.4. Patrón D**

Este patrón está asociado con una distribución Weibull con  $1 < \beta < 2$

#### **4.2.5. Patrón F**

Este patrón de falla es el único que con el tiempo disminuye la probabilidad de falla y es el más común de los patrones. Se le conoce como mortalidad infantil y puede ser causado por diversas razones como son errores en el diseño, instalación incorrecta, operación incorrecta, mantenimiento inadecuado, etc..

#### **4.2.6. Patrón A**

Es el conjunto de los patrones de falla B, E y F.

### **4.3. DETERMINANDO EL PLAN APROPIADO DE MANTENIMIENTO**

De modo que con todos los patrones de falla anteriores, el reto es encontrar un plan apropiado de mantenimiento, al tiempo que se busca asegurar que los activos fijos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan. El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM en inglés), es un proceso que se utiliza para determinar los requerimientos de mantenimiento para un activo fijo en cierto contexto operativo y definir estos planes de mantenimiento.

El proceso de RCM se basa en el seguimiento de siete preguntas relacionadas con el activo o el sistema:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño asociados con el activo en su contexto operativo actual?
2. ¿De qué maneras puede fallar en cuanto al cumplimiento de sus funciones?
3. ¿Qué causa cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿Cuál es la importancia de cada falla?
6. ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir cada falla?
7. ¿Qué se debe hacer si no se encuentra una tarea proactiva factible?

RCM nos ayuda a encontrar una respuesta para cada una de estas preguntas, a tomar acciones y decisiones para prevenir una falla o reducir la probabilidad de que falle a un nivel aceptable por el negocio.

El proceso se realiza conjuntamente con operadores, mecánicos, supervisores, técnicos, etc., por lo que las tareas de operación y mantenimiento resultantes son diseñadas y acordadas por toda esta gente dando como resultado la implementación y aceptación adecuada.

### 4.3.1. La Función y la Falla

La función de un activo es lo que se espera que éste haga bajo un contexto operativo. El enunciado para definir una función está compuesto por un verbo, un objeto y un estándar de desempeño deseado, por ejemplo: Bombear agua del tanque A al B a 200 lt/min.

El desempeño se puede definir de dos formas y se puede ver representado mediante la figura 18:

1. Desempeño deseado, que es lo que el usuario quiere que haga el activo.
2. Capacidad de diseño, que es lo que puede hacer el activo.

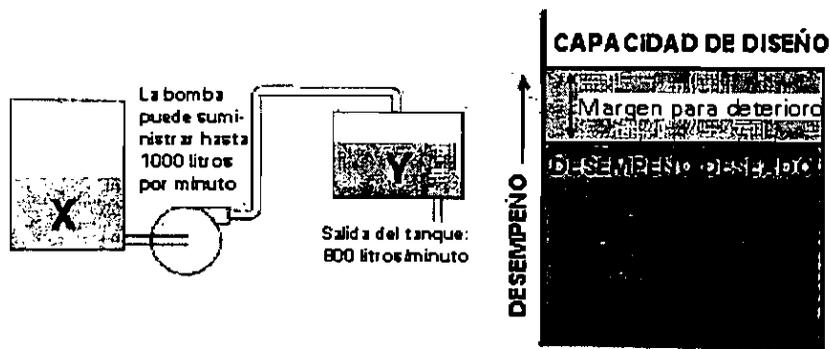


Figura 18

Para que un activo pueda ser mantenible, el desempeño deseado debe ser menor a la capacidad de diseño y para determinar esto debemos conocer la capacidad de diseño del activo así como el desempeño mínimo que el usuario está dispuesto a aceptar, como se puede observar en la figura 19.



Figura 19

Existen dos tipos de Funciones:

1. **Funciones Primarias:** Son las razones primordiales por las cuales el activo se adquirió, son las razones por las cuales el activo existe.
2. **Funciones Secundarias:** En la mayoría de los activos se espera que el activo cumpla con una o más funciones adicionales a sus funciones primarias, éstas pueden quedar contempladas en las siguientes categorías: Integridad ambiental, Seguridad, Control, Apariencia, Protección, Eficiencia y Funciones superfluas.

Se deberá enunciar precisa y correctamente las funciones funcionales para cada activo para que todos podamos entender exactamente que es lo que se quiere y asegurar que las actividades de mantenimiento estén enfocados a las necesidades reales del usuario.

La falla de un activo se puede definir como la incapacidad de cumplir lo que el usuario quiere que haga. Buscamos que en el estándar de desempeño quede especificado lo que el cliente quiere que haga, por ejemplo: Bombear agua a no menos de 200 lt/min.

De modo que el primer paso será registrar todas las funciones y las fallas asociadas a cada función, mismas que denominamos fallas funcionales.

#### 4.3.2. ¿Qué Causa las Fallas?

Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional. Por ejemplo si la función de la bomba es bombear no menos de 200 litros por minuto, la falla será no bombear nada o bombear menos de 200 litros por minuto. Llamamos modo de falla a la forma específica que causa la falla, por ejemplo en el caso de la bomba, para la falla de no bombear nada de líquido podemos tener el motor de la bomba quemado o el rotor atascado, como se muestra en la figura 20. Es a éste nivel en el que se lleva a cabo la administración del

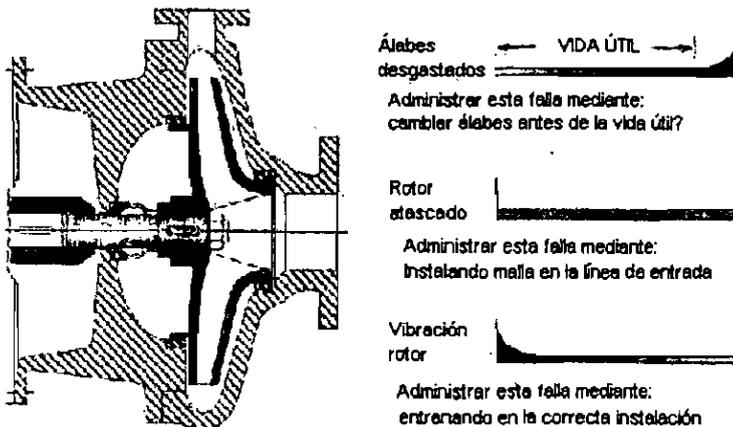


Figura 20

mantenimiento ya que antes de poder desarrollar una estrategia de administración de mantenimiento para cualquier activo, deberá identificarse cuales son o pueden ser los modos de falla.

Los modos de falla pueden presentarse por tres razones principales: disminución de la capacidad, incremento en el desempeño deseado o incapacidad inicial.

Los modos de falla deberán definirse con suficiente detalle para que sea factible seleccionar una política de administración para cada falla. Deberá identificarse la causa raíz de cada falla funcional y no caer en el error de identificar efectos o síntomas de la falla. Al elaborar planes de mantenimiento conviene enfocarse principalmente en los modos de falla que hayan ocurrido anteriormente, que están sujetos a mantenimiento proactivo o que no hayan ocurrido pero tienen ciertas probabilidades de ocurrir. Por supuesto que también toda vez que las consecuencias de un modo de falla son muy severas, aun cuando la posibilidad de falla sea muy pequeña.

### 4.3.3. ¿Qué Sucede Cuando Falla?

El efecto de una falla es la descripción de lo que pasa cuando se presenta un modo de falla. Puede suceder que la falla sea evidente al operador, y la ausencia de la función productiva alertará al operador y nos pueden guiar hacia el modo de falla. En la siguiente sección hablaremos de cuando la falla de la función no es evidente para el operador.

En el caso de las fallas evidentes, la descripción de los efectos de la falla debe incluir los siguientes puntos:

- ¿Qué evidencia existe de que haya ocurrido una falla, cómo se dará cuenta el operador?
- ¿De qué manera puede afectar la seguridad o el medio ambiente?
- ¿De qué manera afecta la producción y operación?

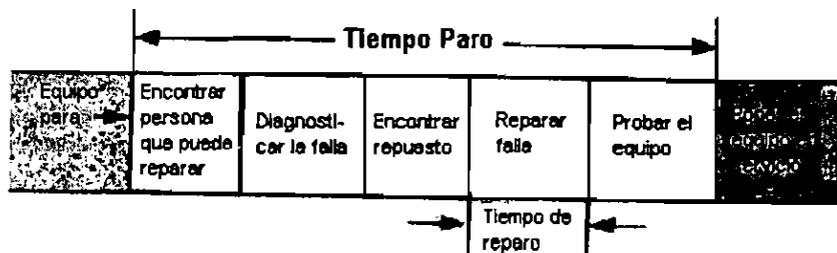


Figura 21

- ¿Cuál es el daño físico causado por la falla?
- ¿Qué deberá hacerse para reparar la falla?

Algunas fuentes de información para recopilar los modos y efectos de falla son los vendedores del equipo, listas genéricas de modos de falla, historial técnico, otros usuarios del mismo tipo de equipo en otras plantas o las personas que operan y mantienen el equipo.

En el Apéndice C podemos consultar más acerca de los efectos de las fallas y algunas técnicas para detectarlos a tiempo y conocer las condiciones del equipo.

#### 4.3.4. Importancia de una Falla

La consecuencia de una falla describe la importancia que tiene cada modo de falla. Cuando se diseña una tarea de mantenimiento, esta tarea con frecuencia tiene más que ver con prevenir o reducir las consecuencias de la falla que el prevenir las fallas en sí. Una tarea proactiva vale la pena realizarla si maneja adecuadamente con las consecuencias de la falla que pretende prevenir.

Algunas fallas ocurren de manera de que nadie se entere que ha sucedido hasta que otra falla suceda. Tal es el caso de las protecciones. Normalmente cuando una protección falla, el operador no se da cuenta sino hasta que la función protectora es demandada. Si se observa bien hay dos funciones: la protectora y la protegida. Y es debido a que las consecuencias de estas fallas pueden ser muy grandes, que es importante analizar la importancia de cada modo de falla haciendo de antemano una distinción entre las fallas funcionales evidentes y las ocultas.

##### 4.3.4.1. Fallas Funcionales Evidentes

Una falla evidente es aquella que será evidente para los operadores bajo circunstancias normales<sup>2</sup>. Las consecuencias de estas fallas se pueden agrupar en tres categorías, poniendo a las personas en primer plano.

###### 1) Consecuencias Ambientales o de Seguridad.

Un modo de falla tiene consecuencias de seguridad si al presentarse la falla puede resultar alguien herido o muerto, y tiene consecuencias ambientales si la falla puede violar alguna norma del medio ambiente.

Para modos de falla con consecuencias ambientales o de seguridad, vale la pena realizar una tarea proactiva solo si ésta reduce la probabilidad de falla a un nivel tolerable. Si no se encuentra una tarea proactiva que valga la pena, no es aceptable el diseño de la máquina desde el punto de vista ético o moral. Es mandatorio realizar un rediseño del equipo.

###### 2) Consecuencias Operacionales.

Un modo de falla tiene consecuencias operacionales cuando se afecta el total de la producción, la calidad del producto, el servicio al cliente, incrementan los costos de operación o el costo de la reparación.

Para modos de falla con consecuencias operacionales, vale la pena realizar una tarea proactiva (preventiva o predictiva) solo si a través de un periodo de tiempo el costo de ésta

---

<sup>2</sup> Evidente en este caso se refiere a que la falla se hace evidente al operador en el conjunto de tareas que normalmente realiza el operador.

es menor al costo de las consecuencias más el costo de la reparación. Si no se encuentra una tarea proactiva que valga la pena, no se deberá realizar mantenimiento alguno; si aún son intolerables las consecuencias se podrá considerar el rediseño con el fin de reducir la frecuencia de la falla, eliminar las consecuencias de la falla o crear una tarea proactiva que sea económicamente factible.

### 3) Consecuencias No Operacionales.

Éstas consecuencias no tienen efecto directo sobre la seguridad, el medio ambiente o las operaciones. Para modos de falla con consecuencias no operacionales, vale la pena realizar una tarea proactiva solo si a través de un periodo de tiempo el costo de ésta es menor al costo de reparación.

#### 4.3.4.2. Fallas Funcionales Ocultas

Decíamos que una falla oculta es aquella que no será evidente para los operadores bajo circunstancias normales. Los dispositivos de protección tienen como finalidad asegurar que las consecuencias de la falla de una función protegida sean mucho menores que si no hubiese protección alguna.

Existen dos tipos de dispositivos de protección: los de “falla segura”, que normalmente ante carencia de energía o cuando fallan lo hacen en forma segura y aquellos que requieren energía para accionar y controlar las condiciones de proceso que se mueven a lo largo de una trayectoria de riesgo cada vez mayor. Las bombas contra incendio, así como las bombas de agua de enfriamiento de un reactor es un ejemplo de este tipo. Siendo dispositivos de protección, la falla en proteger suele ser del tipo de fallas ocultas ya que su falla, por sí sola, no es evidente para el operador bajo circunstancias normales, hasta que la función protectora es demandada por la función protegida.

Son cuatro los estados en que puede encontrarse un sistema de protección y la función protegida:

- 1) No falla del dispositivo de protección ni de la función protegida.
- 2) Falla de la función protegida y no falla del dispositivo de protección.
- 3) Falla del dispositivo de protección y no falla de la función protegida.
- 4) Falla de ambas funciones. Que la función protegida falle mientras el dispositivo de protección se encuentre en estado de falla. Esto, si se observa bien es una falla múltiple.

Lamentablemente la falla de la mayoría de los dispositivos de protección no es evidente. De modo que el objetivo del programa de mantenimiento para una falla no evidente u oculta es la de reducir la probabilidad de la falla múltiple. En este caso las tareas buscan verificar la funcionalidad del dispositivo de protección, o lo que es lo mismo, tareas que buscan encontrar fallas.



### 4.3.5.1. Tareas Preventivas

Las tareas preventivas se basan en que el deterioro es directamente proporcional al esfuerzo aplicado y el esfuerzo aplicado es constante. Si esto es posible, podríamos predecir la vida del equipo con gran precisión. Los casos en los que podemos observar este comportamiento son cuando el componente entra directamente en contacto con el producto, la oxidación, la corrosión y la evaporación.

Podemos diferenciar dos tipos de tareas preventivas, la restauración programada y el reemplazo programado.

#### 1. Restauración Programada

La restauración programada consiste en la rehabilitación de un componente o de un conjunto de componentes antes de un límite de edad preestablecido sin importar su condición en ese momento. La frecuencia de estas tareas está sujeta a la edad a la cual un componente muestra un incremento rápido en la probabilidad de falla, como lo muestra la figura 24.

Las tareas de restauración programada son técnicamente factibles si:

- Existe una edad identificable a la cual el componente muestra un incremento rápido en la probabilidad de falla.
- La mayoría de los componentes sobreviven hasta esa edad.
- La tarea restaura la resistencia a la falla a su nivel original.

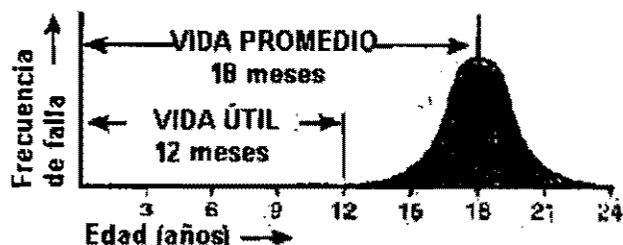


Figura 24

Las tareas de restauración programadas pueden llegar a afectar la operación, pero normalmente sus consecuencias son mucho menores a las de la falla ya que se tendrá tiempo para planear correctamente la tarea antes de realizarla y se deberá efectuar cuando los efectos sobre la producción sean mínimos.

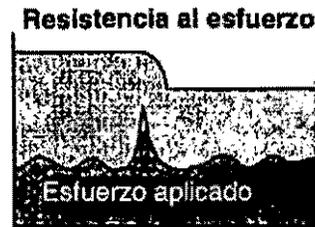
#### 2. Reemplazo Programado

El reemplazo programado consiste en reemplazar un componente a una determinada edad sin importar su condición en ese momento, siempre y cuando el reemplazar el componente viejo con uno nuevo restaure la resistencia a la falla a su nivel original. La frecuencia de estas tareas al igual que la restauración programada, está sujeta a la edad en el que el componente muestra un incremento rápido en la probabilidad de falla.

Para que una tarea de reemplazo programada sea técnicamente factible debe existir una edad identificable a la cual el componente muestre un incremento rápido en la probabilidad de falla y que la mayoría de los componentes sobrevivan hasta esa edad.

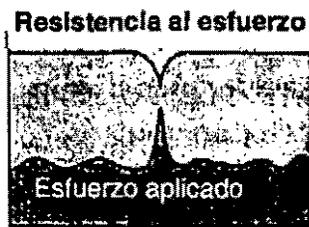
#### 4.3.5.2. Tareas Predictivas

Las tareas predictivas se basan en que el deterioro no siempre es proporcional al esfuerzo aplicado y el esfuerzo no siempre se aplica de una misma manera. En estos casos no existe ninguna relación entre el tiempo que el equipo ha estado en servicio y la probabilidad de que este falle como se puede ver en las figuras 25, 26 y 27.



TIEMPO → **Figura 27**

(ej. un terremoto agrieta una estructura pero no la tira)



TIEMPO → **Figura 25**

(ej. los materiales termoplásticos que suavizan con la temperatura y endurecen de nuevo cuando baja la temperatura)



TIEMPO → **Figura 26**

(ej. un balero se golpea o no se realiza correctamente un servicio)

La reducción del margen entre la capacidad de diseño y el desempeño deseado de los componentes, ha reducido el tiempo para deterioro lo que ha hecho más difícil la aplicación de las tareas preventivas. Así también la complejidad de los equipos ha aumentado, siendo esto un factor importante en las fallas que no se relacionan con la edad, debido a que se incrementan el número de componentes que pueden fallar así como también la cantidad de relaciones entre los componentes, dando como resultado un incremento en el número y variedad de fallas que pueden ocurrir.

Aunque gran parte de los modos de falla no están relacionados con la edad, la mayoría de ellos dan algún tipo de aviso de que están en el proceso de fallar. Una falla potencial es una condición identificable que indica a que una falla funcional está a punto de ocurrir o en

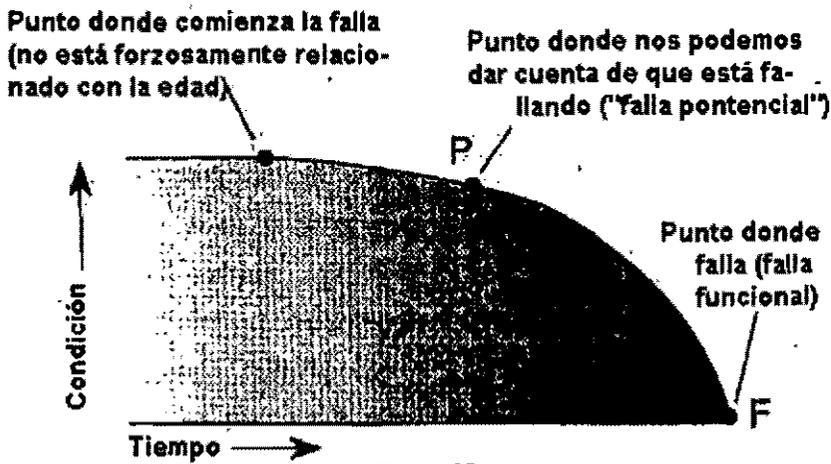


Figura 28

proceso de ocurrir, como lo muestra la figura 28. Por lo que las tareas de monitoreo tienen como finalidad buscar estas fallas potenciales para que se pueda prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la falla funcional.

El intervalo P-F es el intervalo de tiempo que

se encuentra entre la falla potencial (causa) y su deterioro hacia la falla funcional, como lo muestra la figura 29. El intervalo P-F rige la frecuencia de las tareas de monitoreo. Si nosotros queremos anticipar una falla, necesitamos monitorear la condición del equipo a intervalos menores que el P-F con objeto de que sea una tarea que identifique en primer lugar que el deterioro está en progreso, antes de que se presente la falla.

En general es más conveniente tener intervalos P-F largos, ya que de esta manera es posible planear con más tiempo lo necesario para anticipar la reparación y de esta manera evitar las consecuencias de la falla.

Las tareas de monitoreo programadas son técnicamente factibles sí:

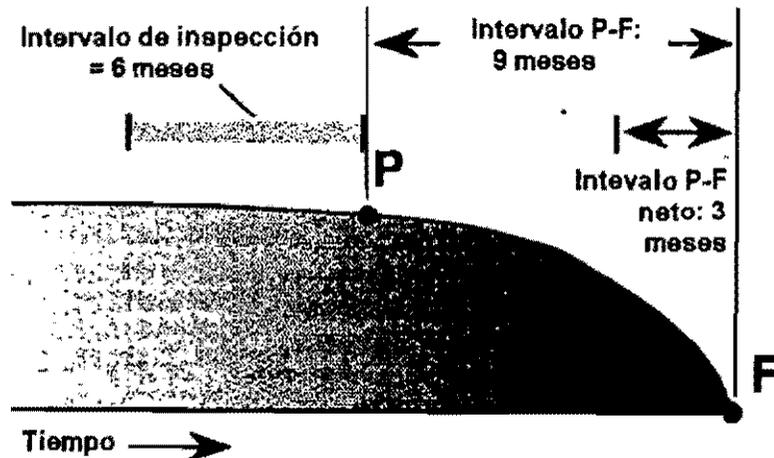


Figura 29

- a) Es posible definir una condición clara de falla potencial.
- b) El intervalo P-F es consistente.
- c) Es práctico monitorear el comportamiento a intervalos menores al intervalo P-F.
- d) El intervalo P-F neto es lo suficientemente largo para que permita tomar alguna acción para prevenir o eliminar las consecuencias de la falla funcional.

Se pueden aplicar cuatro técnicas de monitoreo diferentes:

1. Técnicas de monitoreo de la condición, las cuales utilizan equipo especializado para monitorear la condición del equipo.
2. Técnicas de monitoreo basadas en las variaciones de la calidad en el producto.

3. Técnicas de monitoreo de efectos primarios, las cuales interpretan las lecturas en indicadores como son los manómetros, termómetros, velocímetros, etc..
4. Técnicas de monitoreo basadas en los cinco sentidos del hombre.

#### 4.3.5.3. Tareas Por Omisión

Lo ideal es no hacer nada, si es que las consecuencias de la falla son aceptables. De hecho hacia ese punto se dirige el diseño de los equipos y componentes en la actualidad. "Equipos libres de mantenimiento. De modo que, dependiendo de las consecuencias, normalmente estaremos considerando las siguientes tareas por omisión:

##### 1. Búsqueda de Fallas.

Verificar la funcionalidad del equipo. También denominada la búsqueda programada de fallas. Consiste en revisar la funcionalidad de los dispositivos de protección en intervalos preestablecidos para afirmar que éste sigue funcionando.

Al llevar a cabo una tarea de búsqueda de fallas es importantes revisar físicamente la función, revisar el sistema de protección por completo desde el sensor hasta el actuador, poner atención en no interrumpir la armonía del sistema y minimizar los riesgos mientras se realiza la tarea.

El intervalo para llevar a cabo las tareas de búsqueda de fallas (IBF) está regulada por la disponibilidad (D) deseada y el tiempo medio entre fallas (MTBF), y se calcula de la siguiente manera:

$$IBF = 2(1 - D)(MTBF)$$

La búsqueda programada de fallas es técnicamente factible sí:

- a) Es posible realizar la tarea.
- b) La tarea no incrementa el riesgo de una falla múltiple.
- c) Es práctico realizar la tarea en el intervalo requerido.

Vale la pena realizar una tarea de búsqueda de fallas si ésta reduce la probabilidad de fallas múltiples a un nivel tolerable.

##### 2. Nulo Mantenimiento.

No se hace ningún esfuerzo para anticipar o prevenir los modos de falla a los cuales se les aplique, por lo que estas fallas simplemente se dejan que ocurran y después se reparan.

### 3. Rediseño.

El rediseño consiste en hacer cambios que afectan directamente al modo de falla o mantenibilidad del equipo para eliminar la falla, simplificar el mantenimiento o reducir el impacto de la falla. Incluye modificaciones a los componentes así como cambios en los procedimientos.

En el caso de fallas no evidentes, el rediseño tendrá que reducir la probabilidad de una falla múltiple ya sea haciendo la función escondida que se haga evidente mediante una alarma u otro dispositivo que la presente al operador, sustituyendo la función oculta por una función evidente, sustituyendo el dispositivo existente por uno más confiable, o duplicando la función oculta.

Para justificar el rediseño de las funciones que no tengan fallas con consecuencias ambientales o de seguridad se puede seguir el siguiente diagrama de decisión (figura 30).

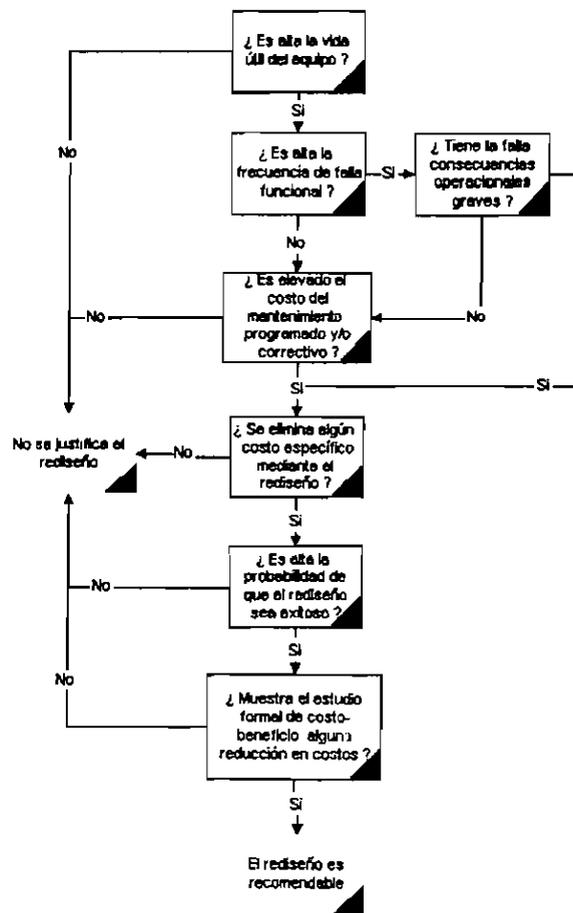


Figura 30

#### 4. Identificación de fallas y reducción del deterioro acelerado.

A través de ejercicios de inspección (por ejemplo “limpiar es inspeccionar”), recorridos, listas de verificación y lugar visual para revisar el estado de funcionamiento del equipo y mejorar su condición, se puede entrenar a la fuerza de trabajo para mejorar la capacidad productiva y el rendimiento de un activo.

En el Apéndice A se pueden consultar algunas secciones para la determinación del plan apropiado de mantenimiento en una planta de manufactura.

#### **4.4. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM)**

Cuando ya contamos con un plan apropiado de mantenimiento, debemos asegurar que nuestras instalaciones de manufactura continúen operando permanentemente, por esto es importante seguir el proceso de Mantenimiento Productivo Total o TPM (*Total Productive Maintenance*).

Este proceso se basa en cinco principios básicos para tener éxito:

1. Buscar maximizar la eficiencia productiva total de los equipos.
2. Establecer un sistema completo de mantenimiento para el equipo.
3. Involucra a varios departamentos.
4. Involucra a cada uno de los empleados desde la gerencia hasta los operadores.
5. Trabaja basado en pequeñas brigadas.

Existen doce pasos para desarrollar TPM hasta su madurez, los cinco primeros pasos conforman la etapa de preparación, en esta etapa se crea un ambiente adecuado mediante el establecimiento de un plan para introducir TPM, los siguientes seis pasos conforman la etapa de implementación y el último paso la etapa de estabilización.

**Paso 1.- Comunicar la decisión de la gerencia para introducir TPM.**

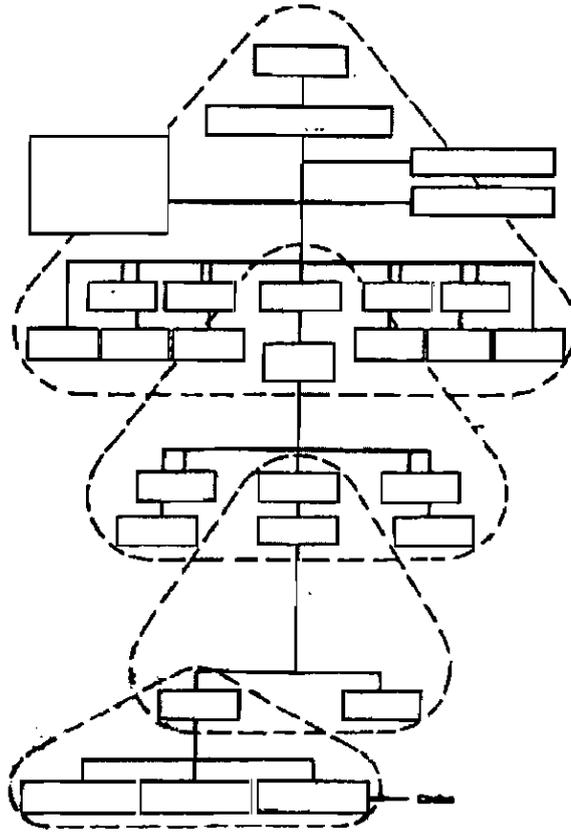
Mediante un proceso de comunicación a toda la planta se deberá anunciar el nuevo proyecto, presentado los conceptos, metas y beneficios.

**Paso 2.- Lanzar campaña de introducción de TPM y educación.**

El objetivo de esta paso es entrenar y elevar la moral de los participantes para que no exista tanta resistencia al cambio. Se deberá entrenar a toda la planta, desde operadores hasta gerentes.

**Paso 3.- Formar estructura de matriz organizacional para fomentar TPM.**

La estructura deberá formarse por brigadas horizontales en cada nivel vertical de la organización. Cada brigada tendrá un líder que participará como miembro de una brigada del siguiente nivel, los líderes funcionan como los enlaces entre diferentes niveles como se muestra en la figura 31.



**Figura 31**

**Paso 4.- Establecer políticas y metas básicas.**

Los líderes del proyecto desarrollan políticas y metas tanto de corto plazo como de largo plazo para la compañía, una vez establecidas, se desarrollan con mayor profundidad en cada departamento y cada nivel.

**Paso 5.- Desarrollar un plan maestro para el desarrollo de TPM.**

Se deberán preparar planes detallados para la implementación de las siguientes actividades:

- Mejorar efectividad de los equipos.
- Establecer programa de mantenimiento autónomo.
- Asegurar la calidad.
- Establecer un programa para mantenimiento planeado.
- Educar y entrenar al personal.

**Paso 6.- Arranque de TPM.**

Este paso consiste en comunicar los logros de la etapa de preparación y a partir de ese momento los trabajadores deberán dejar su forma tradicional de trabajo y comenzar a practicar sus nuevas labores.

**Paso 7.- Mejorar la efectividad de cada componente del equipo.**

Se forman equipos de proyectos para hacer mejoras y eliminar pérdidas mediante técnicas de eliminación de fallas.

**Paso 8.- Desarrollar programa de mantenimiento autónomo.**

Este programa debe comenzar a partir del arranque de TPM y el objetivo es que los operadores realicen actividades de mantenimiento y sean responsables por sus equipos. Para lograr el mantenimiento autónomo se pueden adoptar siete pasos que deberán llevarse a cabo uno a la vez y continuar con el siguiente paso siempre y cuando se tenga completamente dominado el anterior.

- Limpieza inicial. Eliminar polvo y suciedad del equipo, lubricar y apretar tuercas, reconocer problemas potenciales.
- Tomar medidas por efectos del polvo y suciedad. Prevenir causas de suciedad, reducir los tiempos de limpieza y lubricación, mejorar partes de difícil acceso.
- Estándares de limpieza y lubricación. Definir estándares de limpieza y lubricación, establecer frecuencias para estos trabajos, y contar con cartas de lubricación.
- Inspección general. Entrenamiento en procedimientos de inspección, búsqueda y corrección de defectos menores en el equipo.
- Inspección autónoma. Desarrollar y usar un formato de inspección autónoma al equipo.
- Organización y orden. Estandarizar el área de trabajo personal, sistematizar el control de mantenimiento (repuestos, herramienta, limpieza, lubricación, inspección).
- Mantenimiento autónomo total. Desarrollar operadores proactivos y desarrollo de actividades de mejora.

**Paso 9.- Desarrollar programa de mantenimiento para el departamento de mantenimiento.**

Desarrollar un programa que incluya mantenimiento preventivo y predictivo para el departamento de mantenimiento y a su vez esté coordinado con el mantenimiento autónomo realizado por operadores. También se deberá trabajar en la administración de repuestos, herramienta, planos y programas.

**Paso 10.- Entrenamiento para mejorar habilidades de personal de operaciones y mantenimiento.**

**Paso 11.- Desarrollar programa de administración temprana de los equipos.**

El desarrollo de este programa consiste en llevar a cabo actividades de mejora durante las etapas de planeación de inversiones, diseño, fabricación, instalación y pruebas de nuevos equipos. Estas actividades están dirigidas para lograr los más altos niveles posibles en cuanto a inversión en equipos, reducir y eficientizar el periodo entre el diseño y la operación estable, asegurar que el equipo haya sido diseñado con los más altos niveles de confiabilidad, mantenibilidad, economía operativa y seguridad.

**Paso 12.- Completar la implementación de TPM y aumentar las metas.**

## **4.5. ELIMINANDO LAS FALLAS**

El Análisis de Causa Raíz de la Falla por sus siglas en inglés RCFA (*Root Cause of Failure Analysis*), es un método para resolver problemas, que identifica las causas de las fallas y ayuda a entender las verdaderas causas de las fallas.

El análisis de causa raíz de la falla es distinto a las formas típicas para resolver un problema, donde el objetivo es implementar rápidamente una solución. Sucede con mucha frecuencia que cuando se quiere resolver rápidamente un problema se salta de la definición del problema a la especificación de una solución, esto suele suceder sin ni siquiera intentar entender cual es la causa raíz del problema. Como resultado de ésto, la solución no hace más que encubrir los síntomas, mientras que la causa raíz sigue existiendo. Finalmente el problema vuelve a surgir y otra solución se pone a prueba.

El resultado más poderoso al aplicar el análisis de causa raíz de la falla se obtiene cuando se va más lejos que solo encontrar la causa raíz física del problema, cuando se consideran y entienden todas las posibles causas humanas y del sistema operativo que condujeron a la causa física. Por ejemplo, una bomba nueva presenta una fuga debido a una falla en el sello mecánico (física), un análisis más extenso revela que el sello falló debido a que se dejó cerrada la válvula de succión después de arrancar la bomba (humana) e investigaciones más profundas revelaron que los sistemas de administración permitieron que una persona sin experiencia operara la bomba (sistema operativo).

Existen cuatro pasos básicos que deberán seguirse en el análisis de causa raíz de la falla, estos son:

1. Recopilar toda la evidencia e información para ayudar a entender la falla.
2. Formar un grupo para el análisis de causa raíz de la falla que consista en personas necesarias para analizar la falla, ya sean mecánicos, operadores, técnicos, personal que conozca el proceso, etc.
3. Analizar la falla hasta sus causas raíces mediante un árbol del ¿porqué? y continuar el proceso más allá de las causas raíces físicas, hasta llegar a la causa del sistema operativo.
4. Comunicar los resultados del análisis de la falla y dar seguimiento a las actividades de mejora que surgieron debido al análisis.

### **4.5.1. El Árbol del ¿Porqué?**

El árbol del porqué es una variación significativa del llamado árbol de fallas. Como se sabe el árbol de fallas es un desarrollo de la identificación de los modos de falla potenciales de una máquina, de todos los modos de falla, arreglados en combinaciones operativas de las condiciones de falla (and/or) que tiene o compila las probabilidades de falla. Empleado fundamentalmente al hacer un diseño, pretende identificar los modos de falla más sensibles para robustecer en forma económica la confiabilidad de un diseño.

A diferencia del árbol de falla, el árbol del ¿Porqué? es un método para analizar las causas raíces de un problema que ya se ha presentado. No busca enumerar todas las fallas potenciales, sino solo los modos de falla que pudieron haber provocado esa falla específica. Esto es, es una técnica determinista y no estocástica como el árbol de fallas. Es a *posteriori*, a diferencia del de fallas que es a *priori*. Un árbol del porqué se muestra en la figura 32 y se desarrolla siguiendo los siguientes pasos y/o reglas:

- Definir un Evento Significativo o de Falla para investigar.
- Listar las observaciones relacionadas con el evento significativo. Las observaciones son hechos que han sido recopilados mediante los sentidos en el momento de la falla o más tarde examinando el sistema que falló.
- Determinar sobre cual observación se trabajará primero en función del impacto, la probabilidad de estar relacionada con la falla (en el caso de fallas esporádicas), o de la frecuencia de ocurrencia de la misma (en el caso de fallas crónicas). Se asigna el número 5 a la observación que representa una alta frecuencia o probabilidad y el 0 a la que representa una muy baja frecuencia o probabilidad.
- Desarrollar las hipótesis que pueden causar las observaciones. Preguntar ¿Porqué? o ¿Cómo puede? la observación suceder, utilizando la pregunta que le dé mayor sentido. Se debe incluir todas las explicaciones posibles.
- Verificar las hipótesis como verdaderas o falsas mediante pruebas, mediciones, observaciones, etc.. Puede ordenar las verdaderas por su frecuencia, impacto o probabilidad, para elegir sobre cual se continuará trabajando.
- Continuar el proceso, verificando y evaluando las hipótesis. Si la información necesaria no está a la mano, deberá validar la hipótesis en campo o cambiar de rama del árbol y hacer la validación más tarde.
- Detenerse cuando llegue a la causa raíz.

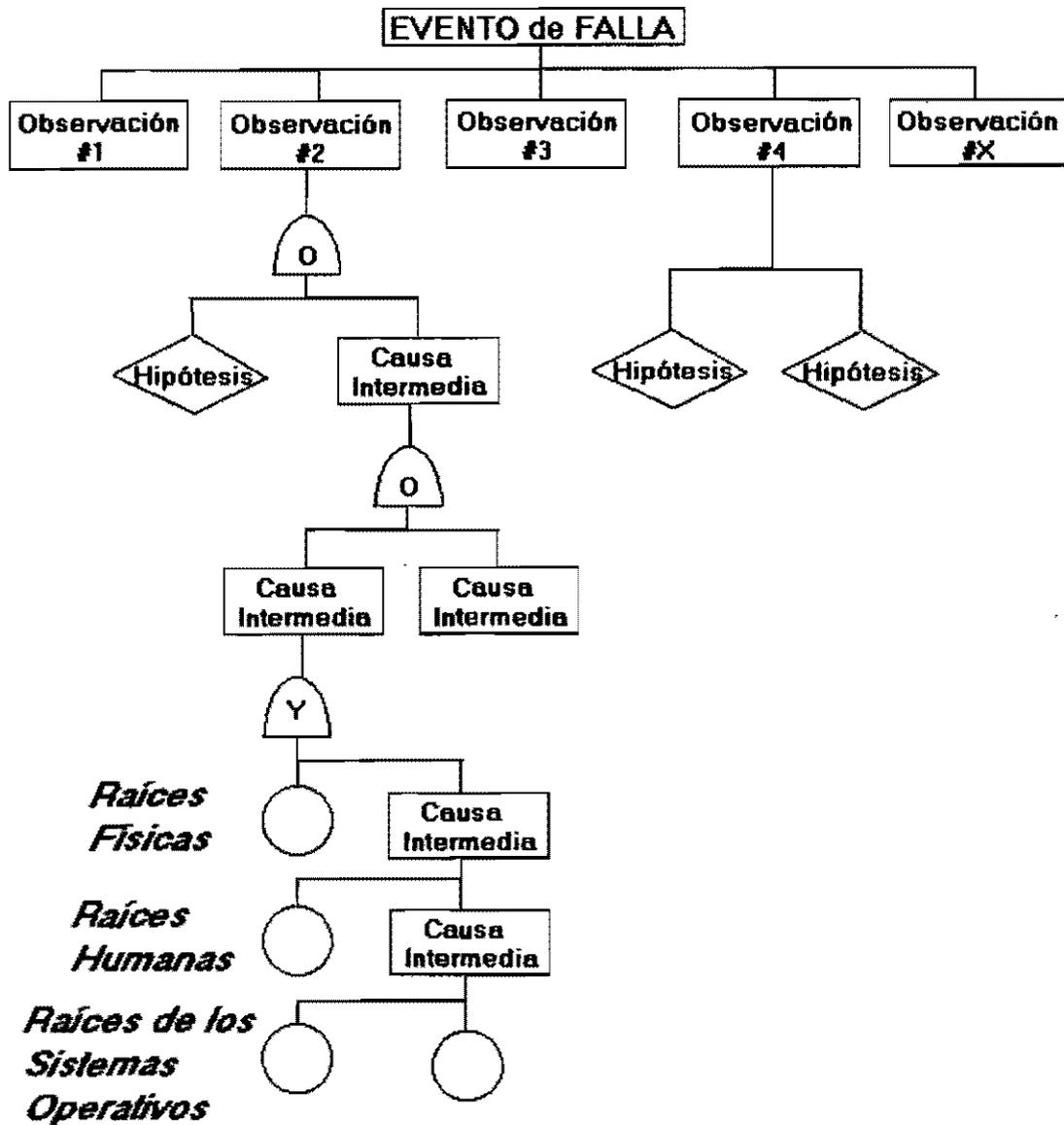


Figura 32

A manera de conclusión de este capítulo, hemos visto varias y poderosas tecnologías para eliminar paros no programados. En el renglón de lo práctico y aplicable a nivel industrial hemos visto varias de las formas de eliminar fallas en el equipo. Desde aquellas que vienen como parte del diseño, pasando por la selección y la instalación del equipo, hasta su correcta operación libre de defectos en un ambiente que evita el deterioro acelerado de este. Hemos visto la forma de desarrollar programas de mantenimiento y la actitud de los operadores para llevar los equipos a sus condiciones ideales de operación, así como una forma sistemática para eliminar fallas repetitivas del equipo.

## **5. PAROS PROGRAMADOS**

Los paros programados son una actividad esencial para cualquier negocio que esté interesado en mantener la confiabilidad de sus equipos y mejorar su capacidad productiva. Los paros programados no solo juegan un papel importante en las transiciones entre diferentes productos, sino también ofrecen la oportunidad de completar mantenimiento preventivo y predictivo en un sistema, así como inspeccionar y mejorar las instalaciones.

Dependiendo del tipo de industria, los paros programados pueden ser muy costosos, pudiendo representar entre 20 y 40 por ciento de los costos de mantenimiento anual así como enormes pérdidas diarias en ingresos.

Para llevar a cabo un paro programado de manera exitosa y en el menor tiempo posible se deberá, primero que nada, conocer los objetivos de dicho paro y las actividades necesarias para cumplir ese objetivo. Podemos identificar las actividades más críticas, enfocar nuestra atención a éstas y reducir económicamente la duración del paro. También es de gran importancia administrar el paro de tal manera que se asegure que no se desvíe del plan original y que todos los esfuerzos realizados tengan los efectos esperados.

### **5.1. REDES**

Las redes son representaciones gráficas del plan de un proyecto, mostrando la relación entre sus actividades. Al desarrollar una red detallada y comprensiva del paro, los usuarios pueden mejorar sus ideas originales, coordinar mejor a los recursos y monitorear más de cerca el paro.

Las redes pueden ser representadas en escalas de tiempo, donde el tamaño de la actividad ya sea una flecha o una barra representa el tiempo que tardará en realizarse. Existen varios esquemas diferentes para el trazado de redes, el diagrama de flechas, el diagrama de nodos y el diagrama de precedencia son algunos de los más representativos para este fin.

#### **5.1.1. Diagramas de Flechas**

En estas redes, las flechas representan actividades, usualmente con descripciones y tiempos estimados escritos a lo largo las flechas, como se muestra en la figura 33. Las flechas que tienen tiempos estimados de cero solamente representan una dependencia entre una actividad y otra. Los eventos son un punto instantáneo en el tiempo donde comienzan las actividades o terminan para comenzar con otras, estos eventos se representan mediante nodos.

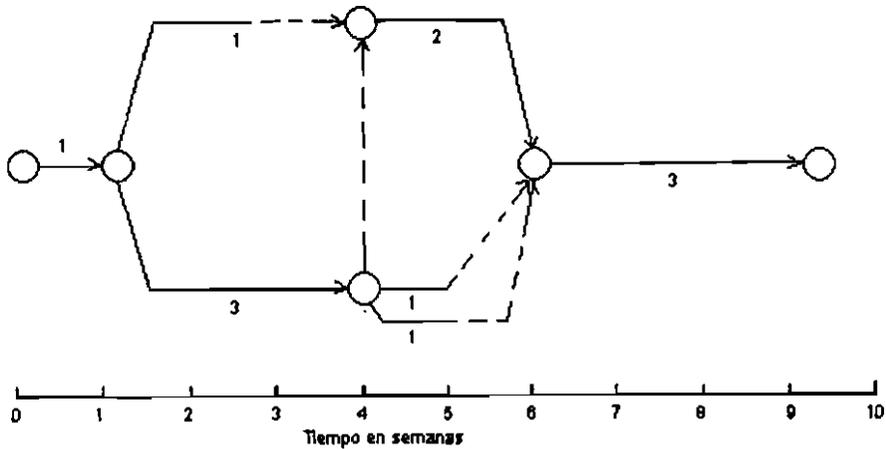


Figura 33

### 5.1.2. Diagramas de Nodos

Estos diagramas son completamente lo contrario que los diagramas de flechas. Los nodos representan las actividades y las flechas son simplemente conectores, indicando relaciones entre actividades, como se muestra en la figura 34.

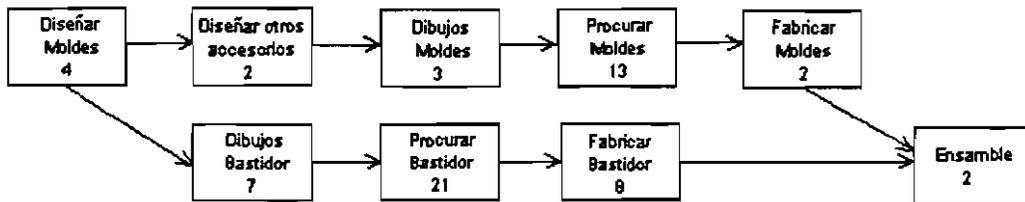


Figura 34

### 5.1.3. Diagramas de Precedencia

Los diagramas de nodos son una extensión de los diagramas de nodos, en éstas se establecen relaciones de precedencia que son relaciones de tiempo entre el comienzo y la terminación de diferentes actividades. Las relaciones utilizadas en el diagrama de precedencia se pueden ver en la figura 35 y se definen como sigue:

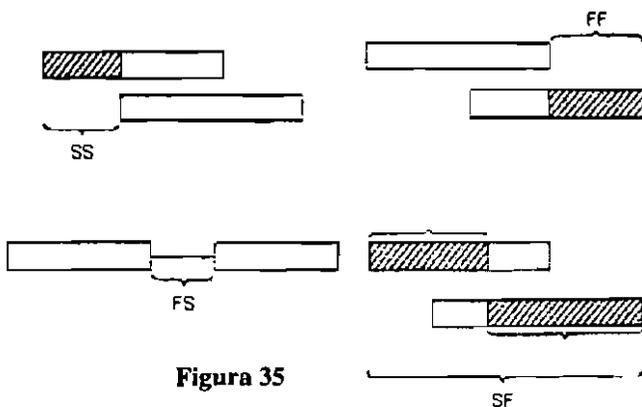


Figura 35

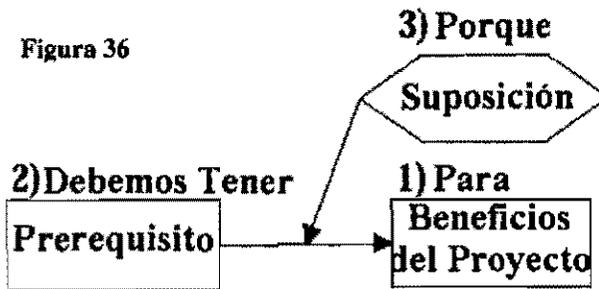
- **SS (start to start)**, tiempo mínimo que se establece como necesario entre el inicio una actividad para que se pueda dar comienzo a la sucesora.
- **FF (finish to finish)**, tiempo mínimo que se establece que deberá

sobrar para completar una actividad al terminar la predecesora.

- FS (*finish to start*), La más común de las relaciones, establece el tiempo mínimo que transcurre entre el término de una actividad y el comienzo de la sucesora.
- SF (*start to finish*), tiempo que se establece entre el comienzo de una actividad y el término de la sucesora.

## 5.2. DEPENDENCIAS NECESARIAS E INNECESARIAS

Figura 36



Cuando estamos creando una red de actividades del paro, es importante asegurar que se incluyen las dependencias necesarias y se excluyen las innecesarias. Una manera de lograr esto es aplicando un proceso sistemático desarrollado a partir de los beneficios derivados del

paro, de manera que se aseguren estos beneficios. Para cada beneficio del paro se desarrolla una declaración de lo que se necesita y porqué se necesitan mediante la aplicación continua del siguiente esquema expresado en la figura 36.

Con las suposiciones adecuadamente documentadas se puede acordar la necesidad de la dependencia y arrojar una red que describe que deberá ser tomado en cuenta y en que orden.

## 5.3. IDENTIFICANDO LA RUTA CRÍTICA

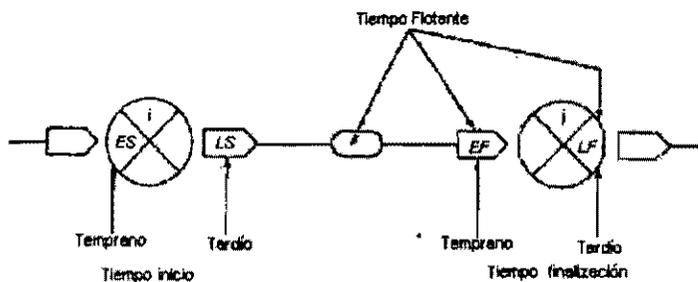


Figura 37

Para poder identificar la ruta crítica del paro tenemos que tener terminada nuestra red de actividades y conocer la duración de cada actividad.

El algoritmo para identificar la ruta crítica consta de dos partes: el llamado paso hacia adelante,

donde se calcula la fecha de inicio más temprana de las actividades, de izquierda a derecha, una pasada hacia adelante desde el inicio hasta el final de la red. La pasada hacia adelante da como resultado los tiempos de inicio y finalización tempranos (ES, EF) para cada actividad, como se muestra en la figura 38.

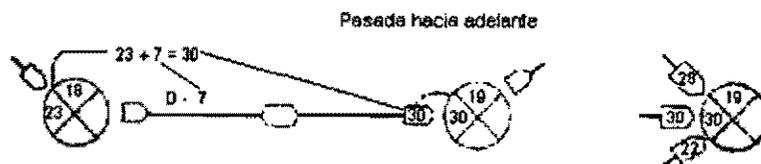


Figura 38

La segunda parte del algoritmo es el cálculo hacia atrás, donde partiendo de la fecha determinada para el final de proyecto, se calculan las fechas más atrasadas a las que las actividades pueden comenzar. La pasada hacia atrás de como resultado los tiempos de inicio y finalización tardíos (LS, LF).

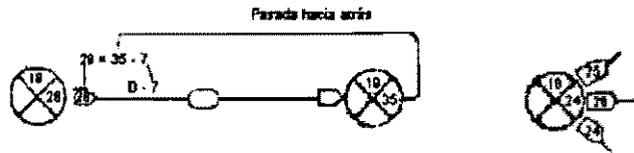


Figura 39

Después de haber calculado la pasada hacia adelante y hacia atrás, el tiempo flotante puede ser calculado para cada actividad.

El tiempo flotante se define como la diferencia entre los tiempos tempranos y tardíos ya sea de comienzo o de término,

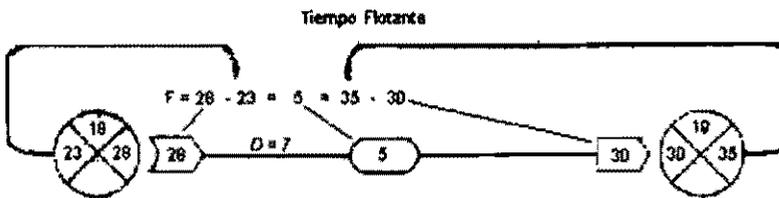


Figura 40

como se muestra en la figura 40. Este tiempo denota el tiempo que una actividad puede retrasarse respecto a su tiempo de término temprano sin afectar el tiempo de comienzo temprano de cualquier otra actividad en la ruta crítica.

La ruta crítica es aquella ruta que no tiene posibilidades de retrasarse ninguna de las actividades que la componen sin retrasar el proyecto. Esto es, no tiene flotación. Si la red tiene eventos iniciales y finales únicos, la ruta crítica es la ruta más larga de toda la red, como se muestra en la figura 41. Ya que la ruta crítica es la que menor tiempo flotante tiene, deberá ser la que más se controle para que los tiempos estimados se cumplan y no se incremente la duración total del paro.

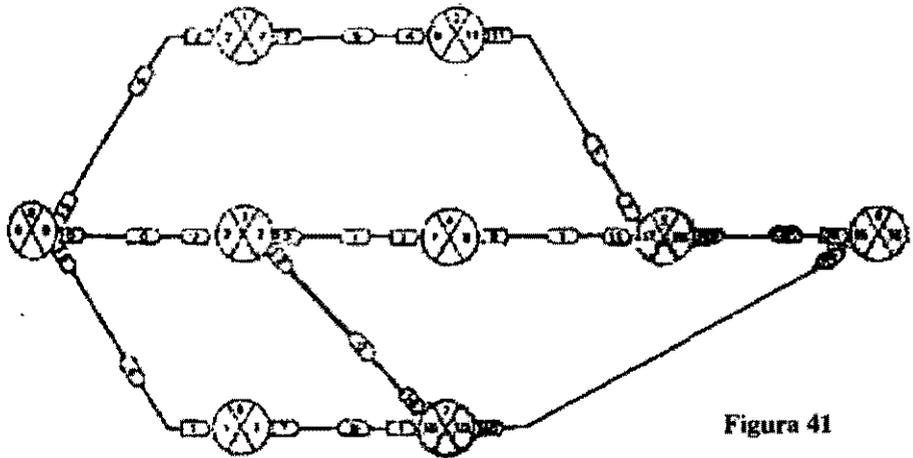


Figura 41

#### 5.4. ENFOQUE ECONÓMICO PARA REDUCIR LA DURACIÓN DEL PARO

El tiempo "normal" de una actividad es el usado en la identificación de la ruta crítica y el que se establece o compromete por quienes realizan la tarea como el tiempo necesario para realizar la actividad con el costo establecido o "normal". Una vez obtenida una red, el tiempo de desarrollo del proyecto puede no ser aceptable, no aceptable en términos

contractuales, legales o de otra naturaleza. Con frecuencia nos vemos en la situación de tener que reducir el tiempo total del proyecto en los términos más económicos posibles.

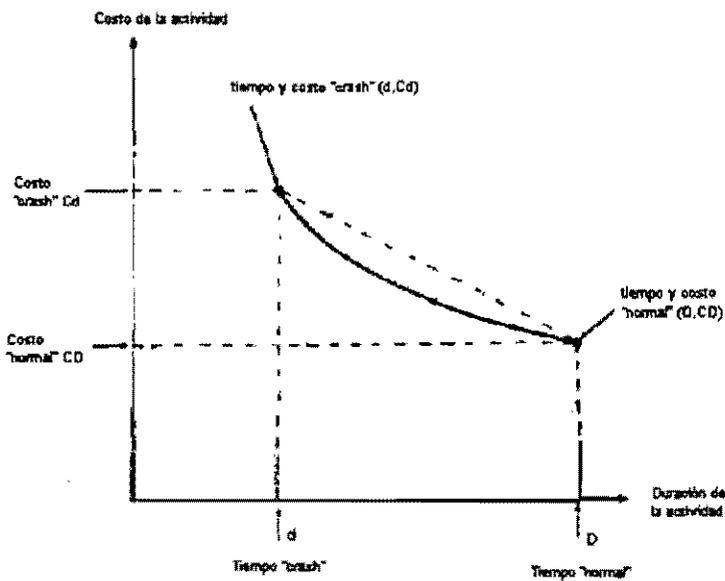
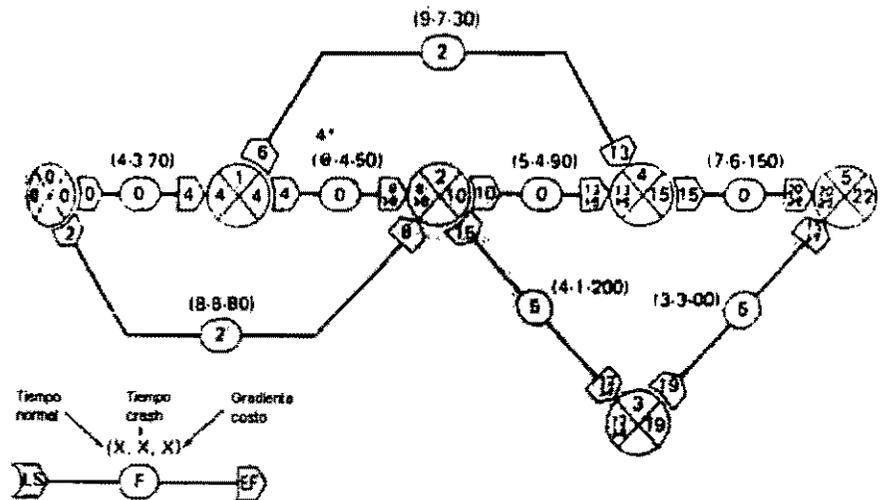


Figura 42

asociado el máximo costo de desarrollo de esta actividad, al que denominamos costo "crash".

Cuando se pretende tener la libertad de ajustar las redes a tiempos menores, se solicita a quien va a realizar las actividades que dé, aparte de los tiempos y costos normales de la actividad, el menor tiempo posible (llamado el tiempo "crash") para desarrollar la actividad y el costo correspondiente. Al menos en teoría, el tiempo "crash" es el tiempo mínimo técnicamente posible, que normalmente estará

De modo que ahora tenemos la información correspondiente a los tiempos normales y costos normales de todas las actividades así como los costos y tiempos "crash", como lo muestra la figura 43. Nuestro objetivo ahora es calcular el costo total del proyecto correspondiente a los tiempos normales, así como ir reduciendo un día a la vez la duración del proyecto y cual de todas las actividades crash



| Actividad | Normal |         | "Crash" |         | Gradiente Costo |
|-----------|--------|---------|---------|---------|-----------------|
|           | Tiempo | Costo   | Tiempo  | Costo   |                 |
| (0, 1)    | 4 días | \$210   | 3 días  | \$280   | 570             |
| (0, 2)    | 8 días | 400     | 6 días  | 560     | 80              |
| (1, 2)    | 6 días | 500     | 4 días  | 600     | 50              |
| (1, 4)    | 9 días | 540     | 7 días  | 600     | 30              |
| (2, 3)    | 4 días | 500     | 1 día   | 1,100   | 200             |
| (2, 4)    | 5 días | 150     | 4 días  | 240     | 90              |
| (3, 5)    | 3 días | 150     | 3 días  | 150     | **              |
| (4, 5)    | 7 días | 600     | 6 días  | 750     | 150             |
|           |        | \$3,050 |         | \$4,280 |                 |

Figura 43

escogemos para que esta reducción de un día se haga en los términos más económicos. El procedimiento utilizado para reducir la duración del paro consiste en seleccionar tiempos entre el "normal" y el "crash" de cada actividad para minimizar la duración del paro con el mínimo incremento en costos, al mismo tiempo deberán satisfacerse las restricciones entre las actividades del paro.

Con la información de los tiempos y costos "normales" y "crash" de todas las actividades de la red, calculamos el gradiente de costo y que es la diferencia de costos normal y "crash" entre la diferencia de tiempos normal y de "crash", tal como lo ilustra la figura 43.

La figura 44 ilustra un espacio cartesiano donde en las abscisas tenemos el tiempo del proyecto, y en las ordenadas

tenemos el costo del proyecto. En este espacio podemos empezar a identificar la región de la que hablamos. En primer lugar colocamos el punto que corresponde a la duración del

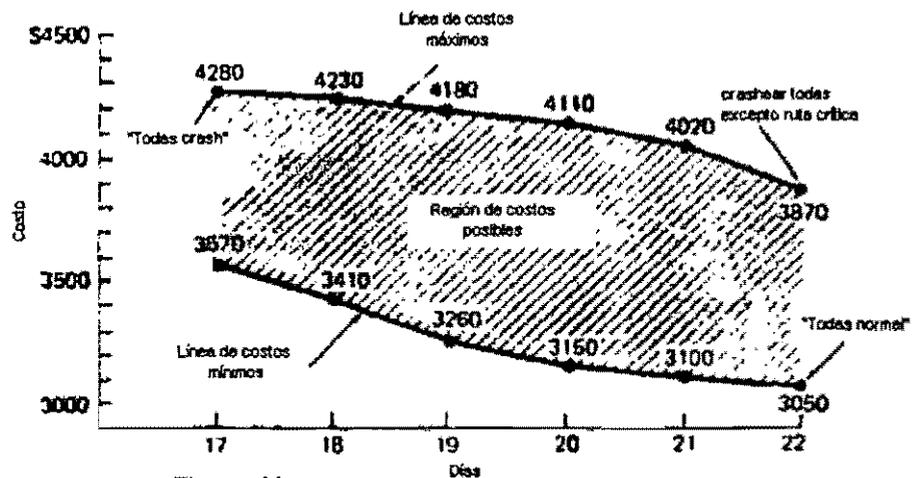


Figura 44

proyecto en donde todas las actividades a su valor "normal" tanto en tiempo como en costo. Esto nos da una duración del paro máxima determinada por las actividades en la ruta crítica y un costo directo mínimo del paro, mínimo entendido hasta este momento como el de costos en actividades de paro. El costo directo del paro se puede incrementar a un valor máximo para la misma duración, si se calculan todos los tiempos "crash" excepto las actividades que corresponden a la ruta crítica. Esto define el punto de 22 días con mayor costo de \$3870.

La duración del paro puede empezar a disminuirse en un día, y aumentar el costo del proyecto. En términos heurísticos simples esto se logra si escogemos ahora reducir un día en la actividad que esté en la ruta crítica, y que tenga el gradiente de costo más pequeño. Al reducir la ruta crítica otras actividades paralelas a la recortada pueden pasar a ser críticas en el sentido de que se les acaba la holgura. A partir de este momento, reducir un día del proyecto implica invertir en todas las actividades que hacen crítica a la ruta en ese tiempo específico.

Si se realizan todas las iteraciones posibles, ya sea "crasheadas" innecesariamente o no, se podría encontrar un rango de posibles costos para cada duración total del paro tal como se observa en la figura 44.

Se puede formular un problema de programación lineal para determinar estas actividades críticas con el mínimo costo, tal como se muestra en el apéndice B, mismo que hemos resuelto con el programa "SOLVER®" de Microsoft Excel®. Aquí solo tenemos que definir la duración total del paro, las restricciones para cada actividad y las posibles rutas de la red.

#### 5.4.1. Hasta Dónde Reducir la Duración del Paro

Hemos ido viendo la forma de reducir el tiempo del proyecto al tiempo que aumentamos el costo del paro. Cuando reducimos la duración de un paro, llega un momento en el que el incremento en costo por reducir otro día más el paro, es mayor a la ganancia que podemos obtener por producir un día más. Sin demostrarlo, es fácil concluir que la duración óptima del paro queda definido cuando el incremento de costos por reducir el paro en un día más sean iguales a los beneficios que se obtendrían por producir ese día.

### 5.5. PROBABILIDAD DE FINALIZAR ANTES DE UNA CIERTA FECHA UN PROYECTO (PERT)

Cuando se trabaja con paros programados grandes se deberá tomar en cuenta la probabilidad de que el paro sea finalizado para una cierta fecha. Si una actividad se espera que se realice en 10 días y es probable que varíe de 9 a 11 días, no deberá ser tratada de igual manera que una actividad que también se espera que se realice en el mismo tiempo pero podrá variar de 2 a 25 días. El PERT (*Program Evaluation Review Technique*) es una herramienta que ofrece un método para manejar las probabilidades asociadas con esta variación, haciendo posible calcular la probabilidad de que el paro se complete en periodos determinados de tiempo.

Esta metodología de cálculo requiere la definición de tres tiempos estimados para cada actividad del paro, como lo muestra la figura 45 y de acuerdo a las siguientes definiciones:

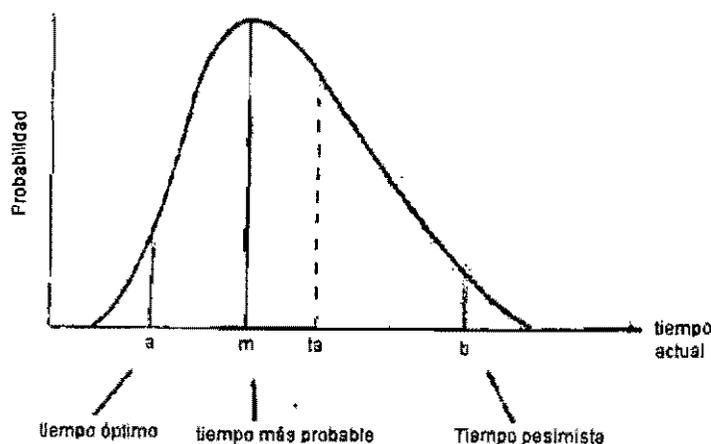


Figura 45

- Tiempo estimado optimista ( a ). Es el tiempo en el que la actividad puede ser realizada en un menor lapso de tiempo repetidamente bajo las mismas condiciones solo en 5% de las ocasiones.
- Tiempo estimado más probable ( m ). Es el valor modal de la distribución.

- Tiempo estimado pesimista ( b ). Es el tiempo en el que la actividad podrá ser realizada en un mayor lapso de tiempo repetidamente bajo las mismas condiciones solo en 5% de las ocasiones.

Comúnmente en la estadística, la desviación estándar para distribuciones unimodales pueden ser estimadas como 1/6 del rango de la distribución. Esto es debido a que por lo menos el 89% de los casos en cualquier distribución se encuentra a 3 desviaciones estándar de la media, y en el caso de distribuciones normales este porcentaje es de 99.7%. Es por esto que podemos usar los tiempos estimados "a" y "b" para estimar la desviación estándar  $(V_t)^{1/2}$  o la variancia  $V_t$ , como sigue:

$$(V_t)^{1/2} = \frac{(b-a)}{3.2}$$

Una ecuación simple para estimar la media,  $t_a$ , de la actividad es:

$$t_a = \frac{(a + 4m + b)}{6}$$

La media es igual al tiempo estimado más probable ( $t_a = m$ ) solo si los tiempos optimistas y pesimistas están colocados simétricamente alrededor del tiempo más probable ( $b-m = m-a$ ).

### 5.5.1. Para la Ruta Crítica

La media del paro ( $t_p$ ) es la suma de las medias de las actividades de la ruta crítica. La variancia del paro ( $V_p$ ) es la suma de las variancias correspondientes a la ruta crítica, en caso de que hayan dos rutas críticas, se escoge aquella que tenga la mayor suma de variancia.

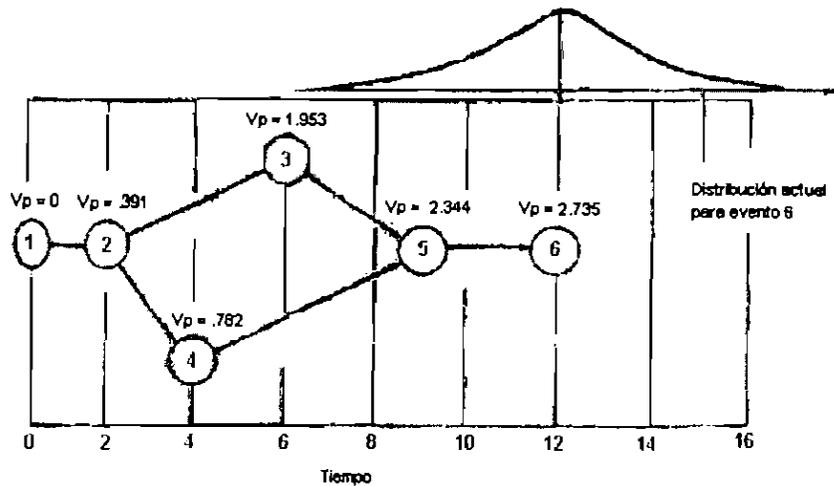
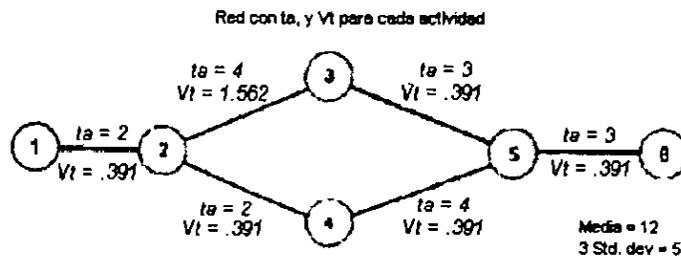
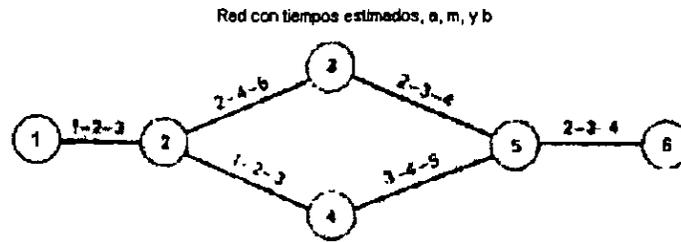


Figura 46

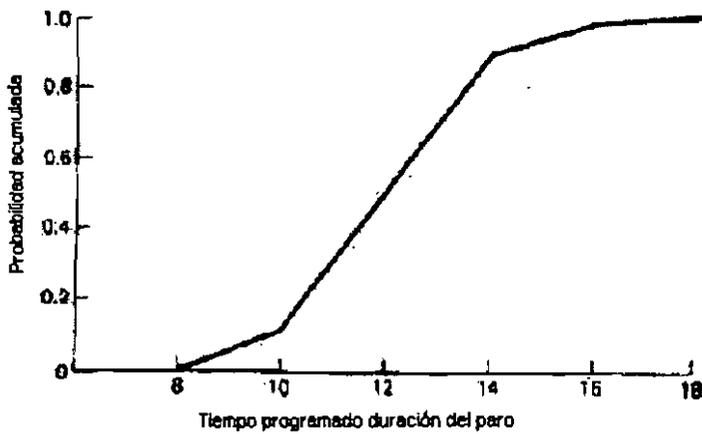


Figura 47

Debido a que un paro es la suma de un conjunto de actividades, se puede hacer uso del Teorema del Límite Central y asumir que la ruta crítica tiene una distribución normal.

Para calcular la probabilidad acumulada se deberá hacer uso de la siguiente ecuación.

$$Z = \frac{(t - t_p)}{\sqrt{V_p}}$$

Siendo Z el número de desviaciones estándar que se aleja la fecha en cuestión (t) de la media del paro ( $t_p$ ). La probabilidad correspondiente a la Z calculada se puede encontrar en tablas de distribución normal.

### 5.5.2. Para Más de Una Ruta

En algunos casos es necesario tomar en cuenta más de una ruta para calcular la probabilidad de terminar para una fecha determinada, esto puede suceder cuando el número de actividades convergentes se incrementa, la variancia de las actividades que convergen incrementa o el tiempo estimado de cumplimiento de actividades convergentes se acercan entre ellas, ya que de ser así, aumenta la probabilidad de que otra ruta se convierta en crítica.

Una segunda ruta debe ser considerada cuando la diferencia entre los tiempos de cumplimiento de las dos actividades convergentes sea menor a la desviación estándar mayor de éstas. Si existen más de dos actividades convergentes, esta regla deberá aplicarse a las dos actividades con tiempos de cumplimiento mayores.

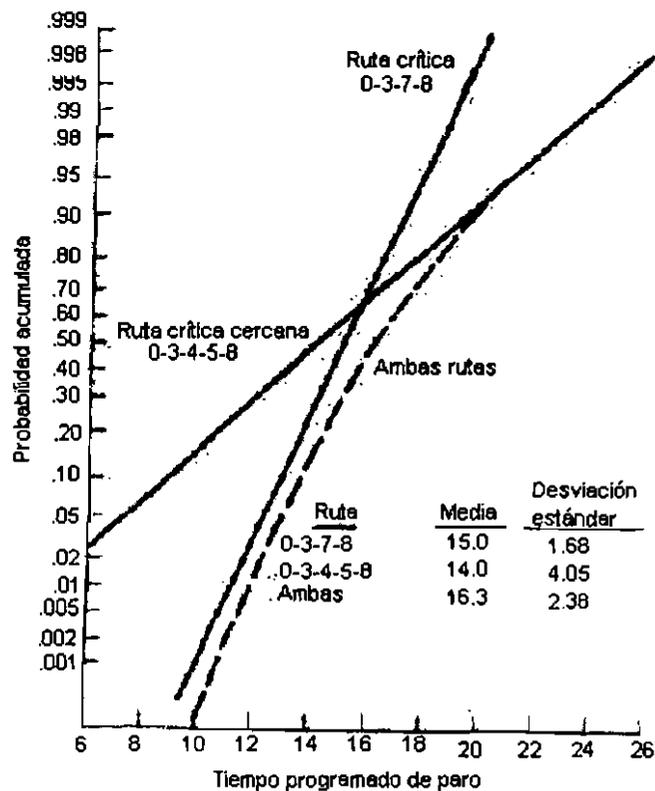


Figura 48

Si graficamos la probabilidad acumulada de las dos rutas podemos notar que se cruzan en algún punto, como se muestra en la figura 48, lo que quiere decir que a partir de ese tiempo la otra ruta es la que manda debido a la gran variancia.

La probabilidad (P) de que el paro sea completada antes de una fecha predeterminada es el producto de las probabilidades acumuladas de cada ruta tomada en cuenta ( $P_1, P_2, \dots, P_n$ ).

$$P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$$

## 5.6. CADENA CRÍTICA

Aún cuando existen similitudes entre la ruta crítica y la cadena crítica, el concepto de cadena crítica es más amplio ya que:

1. En primer lugar toma en cuenta que adicionalmente a las actividades críticas de la ruta crítica, son los recursos los que pueden hacer crítica una ruta, aspecto que no es considerado por el algoritmo tradicional de ruta crítica, pero que en la práctica es la causante más común que los proyectos se retrasen por falta de recursos o empleo conflictivo de los recursos, más que porque las tareas no se puedan hacer en los tiempos estipulados en las prácticas de medición del trabajo.
2. La segunda diferencia fundamental es que parte, al igual que PERT, de que los tiempos asignados a las tareas no son para dar un 100% de certeza en la terminación de las actividades.

Así pues se conoce como cadena crítica a la ruta más larga de actividades dependientes, tanto por dependencias de trabajo (las flechas entre actividades) como por dependencias de recursos (la dependencia implícita entre actividades usando el mismo recurso). Un ejemplo de cadena crítica se puede observar en la figura 49, donde en cada actividad se observa los recursos empleados según el color. La cadena crítica, a diferencia de la ruta crítica en este caso, es crítica en cuatro actividades que utilizan dos recursos críticos.

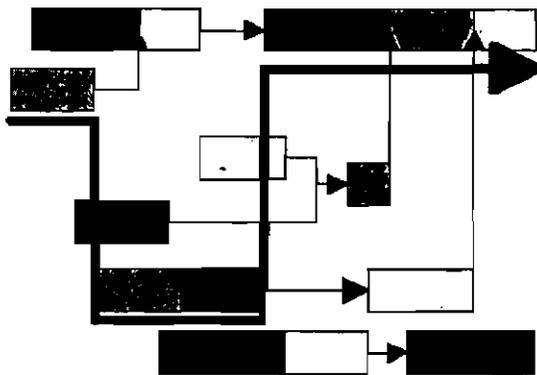


Figura 49

El segundo principio que ha sido integrado dentro del acervo de herramientas de la cadena crítica es el relacionado con el tiempo estimado de las actividades del paro. La experiencia muestra que normalmente el tiempo de las actividades es bastante holgado para que la tarea sea completada a tiempo, ya que la persona que se compromete con la tarea normalmente compromete este tiempo en base a su peor experiencia. Pero aún cuando existe esta holgura, dicha holgura

no suele darse en la práctica debido a que los trabajadores tienden a desarrollar la actividad hasta el último momento de todo el tiempo que disponen, aún cuando pueden completar su trabajo antes de lo programado, y se les permite más tiempo para distracciones en lugar de enfocarse 100% a una sola actividad.

Con esto en mente, la técnica administrativa detrás de la cadena crítica es solicitar o demandar del trabajador que lo haga a la mitad del tiempo inicialmente otorgado, en el entendido que la probabilidad de terminarla no sea de 100%. Así pues, el primer paso es recortar el tiempo estimado de todas las actividades que componen el paro a la mitad de tiempo, y la experiencia nos muestra que el 80% de los casos, se cumplen las fechas así recortadas y las actividades retrasadas se terminan en mucho menos tiempo que el estimado antes del recorte.

Con estos antecedentes del método podemos observar que si la duración real de una actividad puede estar representada por una curva de distribución de probabilidades como la mostrada en la sección anterior (PERT), entonces estamos hablando de que el tiempo base de cada actividad corresponde a un tiempo medio tal que la probabilidad de terminarlo es del 50%. De esta manera si la actividad termina en este tiempo, las actividades sucesoras están "preparadas" para tomar ventaja de esta ganancia. A diferencia de la técnica administrativa empleada en ruta crítica, que si una actividad termina antes, la sucesora no está preparada para aprovechar este adelanto.

Imaginemos un conjunto de actividades en serie de una de las ramas del proyecto. Si ponemos una actividad en serie a todas estas actividades con duración de todos los recortes de los tiempos, podemos formar un buffer, como se muestra en la figura 50. De modo que

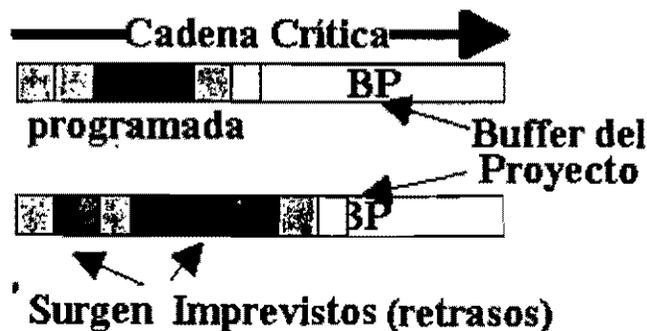


Figura 50

las actividades igual tienen la probabilidad de terminar antes que después. Es probable que compensen los atrasos de unas con los adelantos de otras. Pero aun así, la probabilidad de terminar, sin considerar el buffer, puede ser del 50%. Pero una fracción del buffer puede mejorar sustancialmente la probabilidad de terminar todas las actividades de la rama.

Así pues, con los tiempos recortados de las actividades podemos formar buffers. El primer buffer es el del proyecto, que representa la mitad de la duración del paro, se le denomina "buffer del proyecto" y se representa unido a la cadena crítica como lo muestra la figura 51. El buffer del proyecto tiene como objetivo amortiguar los retrasos de la cadena crítica, pero

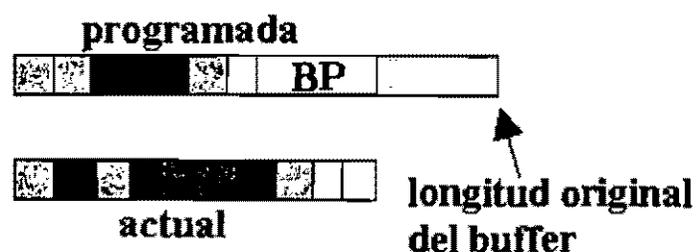


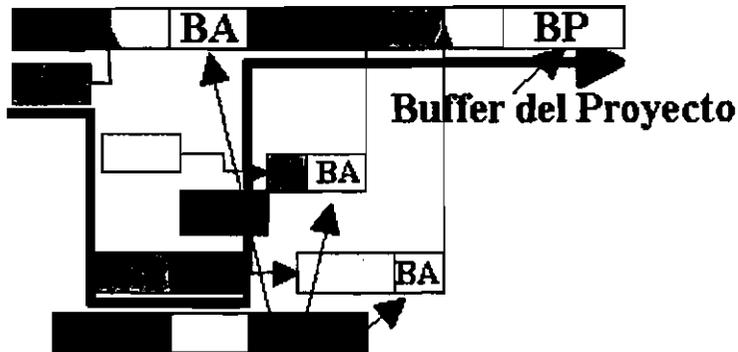
Figura 51

como mencionamos anteriormente, los retrasos no utilizarán por completo el buffer, es por esto que el buffer del proyecto puede ser recortado a la mitad y como consecuencia de esto, se reducirá el paro de inicio en una cuarta parte.

Si las actividades de la cadena crítica no utilizan por completo el buffer del proyecto, se podrá finalizar aún antes de la fecha programada el paro.

### 5.6.1. Evitando Retrasar la Cadena Crítica

De manera que, para que no se retrasen las actividades de la cadena crítica por motivos



**Buffers de Alimentación**

Figura 52

de la cadena crítica por motivos externos a sus propias actividades, se crean buffers de alimentación y buffers de recursos. Los buffers de alimentación (BA) se crean al final de todas las rutas (ramas) que alimentan a la cadena crítica como se muestra en la figura 52.

Los buffers de recursos se crean entre actividades de la cadena crítica y aquellas que no son de la cadena crítica

pero utilizan los mismos recursos. Desde el punto de vista administrativo, en la vida real, la forma de administrar es similar a la empleada para controlar aviones que se aproximan a un aeropuerto en el radar, que define tres zonas: roja, amarilla y verde. Conforme el proyecto va avanzando, una tarea inicia en zona roja, cuando no se ha programado su inicio. Luego entra a zona amarilla, donde los recursos entran en preparación para iniciar sus actividades en cualquier momento, que es cuando la tarea entra en zona verde. Indirectamente de esta manera el buffer correspondiente es administrado.

## 5.7. ADMINISTRANDO EL PARO

Conjuntamente con la elaboración del programa del paro, es de suma importancia realizar una serie de actividades durante la planeación del paro, la entrega del equipo, la ejecución del paro y el arranque de las instalaciones de manufactura.

### 5.7.1. Coordinación Entre la Planta y la Compañía

La planta y la compañía deberán fijar las fechas tentativas para iniciar y terminar el paro, para esto se deberán tomar en cuenta factores como la disponibilidad de las instalaciones y de los recursos, el pronóstico de ventas y los riesgos climatológicos.

### **5.7.2. Formación del Equipo para el Paro**

El administrador de la planta asigna al coordinador del paro y trabaja con él para asignar el resto del equipo del paro. El equipo del paro deberá cumplir con ciertas responsabilidades que consisten en definir las responsabilidades del equipo del paro y de cada miembro, así como desarrollar un programa con fechas para el proceso de planeación.

### **5.7.3. Auditar Equipos de Proceso y Condiciones de Operación**

Revisar y evaluar las condiciones de operación de los últimos años, auditar la condición de los equipos de proceso y determinar que equipos deberán ser inspeccionados, reparados o reemplazados durante el paro. La idea fundamental es evitar sorpresas al abrir los equipos y no se cuente con los medios para resolver contratiempos dada la condición de la maquinaria.

### **5.7.4. Planeación y Programación de las Actividades del Paro**

La planeación de las actividades del paro consiste en desarrollar una descripción detallada y pasos a seguir para completar cada actividad del paro, que contemple los siguientes puntos:

- Métodos para recolectar, manejar y remover los desperdicios generados durante el paro.
- Permisos requeridos para completar cada actividad.
- Métodos para preparar los equipos para mantenimiento.
- Localizar los peligros potenciales.
- Localización de las tareas.
- Listas de equipos y materiales a ser instalados.
- Listas de equipo y herramientas especiales.
- Listas de equipo de protección personal para realizar las tareas.
- Planes de contingencia para manejar eventos inesperados durante el trabajo o arranque.
- Listas de consideraciones de seguridad para cada actividad.
- Grupos de trabajo y habilidades necesarias para completar cada tarea.
- Tiempos estimados y número de personas necesarias para realizar cada parte de la tarea.
- Entrenamiento que deberá impartirse antes de realizar las tareas.
- Revisiones para el arranque.

La programación del paro consiste en desarrollar un programa detallado del paro con la secuencia de todas las actividades ha ser completadas desde la fase de Pre-Paro hasta la fase de Post-Paro.

### **5.7.5. Planeación de Recursos**

Identificar, asignar y obtener los recursos necesarios para realizar las actividades del paro. Considere los efectos de agotamiento en el personal, mantenga la continuidad del personal en las tareas y termine un tarea por completo antes de comenzar con otra. Dentro de estos

recursos se contemplan maquinaria y herramienta especiales, partes de refacción, así como todo equipo de soporte e infraestructura necesaria.

#### **5.7.6. Contratistas y Recursos Externos**

Identificar y programar a los contratistas y recursos externos necesarios para la ejecución del paro. Siempre que sea posible se deberá utilizar personal de la planta antes que personal contratista, se deberá involucrar a los contratistas en el proceso de planeación y deberán recibir entrenamiento y orientación en cuanto a las instalaciones antes del inicio del paro.

#### **5.7.7. Administración de Materiales**

Identificar, conseguir y organizar los materiales y equipo necesario para realizar cada actividad del paro. Organizar paquetes de materiales y equipos especiales para cada actividad y colocarlos en áreas designadas. Asegurar la disponibilidad de equipo contra incendio, primeros auxilios y de control de desastres.

#### **5.7.8. Preparar Equipos para Trabajos de Mantenimiento**

Desconectar, limpiar y preparar los equipos para los trabajos de mantenimiento de acuerdo a los procedimientos de operación, para esta actividad deberá estar claramente definido el responsable ya que implica posibles riesgos de seguridad.

#### **5.7.9. Verificar Estado y Entrega del Equipo**

Verificar que el equipo no presente riesgos y de ser así, entregar el equipo a las personas que trabajarán con él.

#### **5.7.10. Ejecución y Retroalimentación Diaria de las Actividades**

Proveer información diaria sobre el estado de las actividades, mediante la realización de juntas donde se revisarán los siguientes puntos: las tareas a realizarse durante el día, el trabajo completado, la preparación de tareas del día siguiente y el estado respecto al programa. El control de costos se realiza normalmente mediante el llamado método de valor ganado. Para ayudar a monitorear el costo del paro se suele hacer uso de las siguientes métricas y donde se muestran en la figura 53:

- Costo Actual de Trabajo Realizado (ACWP) es la cantidad gastada hasta la fecha.
- Costo Presupuestado de Trabajo Realizado (BCWP) es la cantidad presupuestada del trabajo hecho hasta la fecha.
- Costo Presupuestado de Trabajo Programado (BCWS) es la cantidad presupuestada del trabajo programado hasta una fecha dada.

Variación en Costo =  $BCWP - ACWP$

Variación en Programa =  $BCWP - BCWS$

% sobre programa =  $(ACWP - BCWP) / BCWP \times 100$

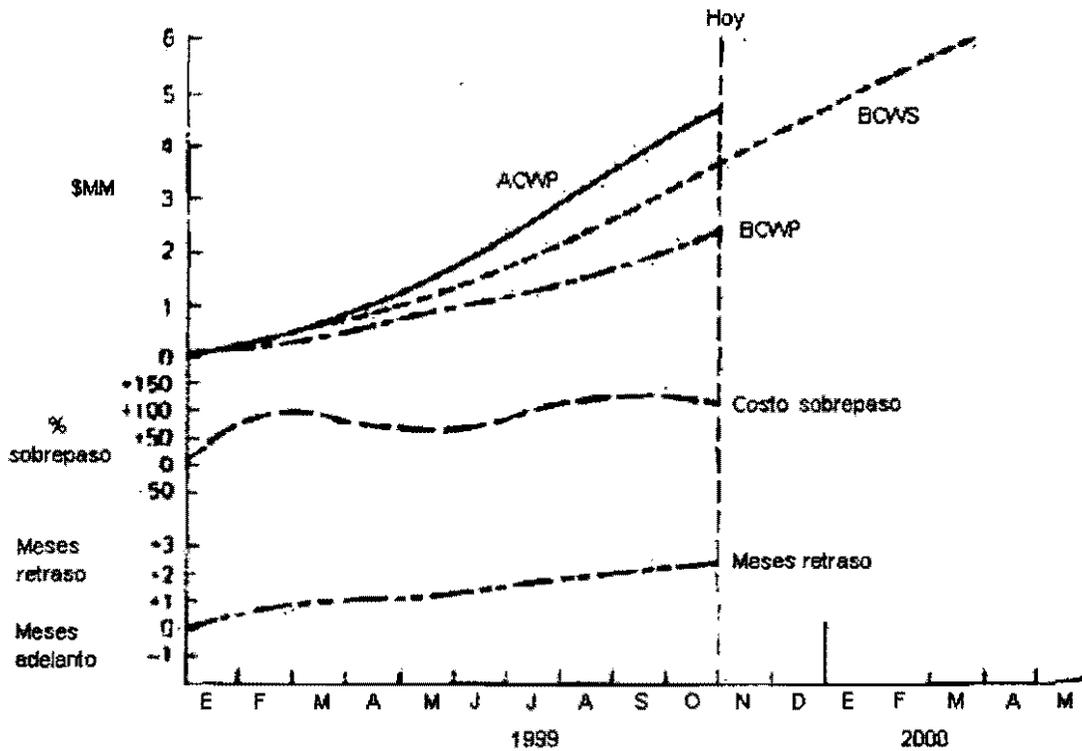


Figura 53

Por otro lado es posible definir un Índice de Desempeño de Costo (CPI: *Cost Performance Index*) como:

$$(CPI) = BCWP / ACWP$$

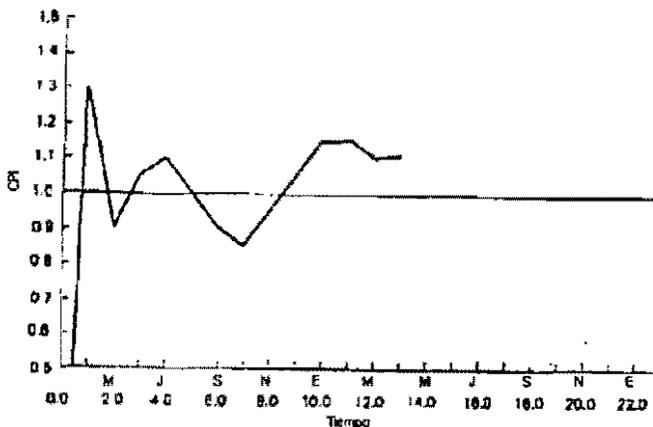
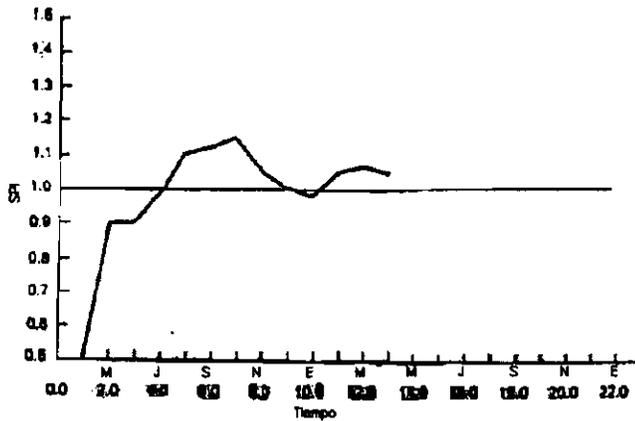


Figura 54

Un ejemplo de este índice se presenta en la figura 54. Cuando los valores de CPI son mayores a 1 indica que los costos están por debajo del presupuesto.

Otro índice que puede definirse es el Índice de Desempeño del Programa (SPI: *Schedule Performance Index*) como:



$$(SPI) = BCWP / BCWS$$

Un ejemplo de este índice se presenta en la figura 55. Cuando los valores de SPI son mayores a 1 indica que se está terminando antes de lo programado.

Figura 55

### 5.7.11. Ejecución Enfocada Hacia la Seguridad y el Orden

Es importante mencionar que cuando se trata de reducir tiempos y acelerar los trabajos frecuentemente es sacrificado el orden y el cuidado en la seguridad del trabajo. Los trabajadores deberán comprometerse en mantener los estándares de seguridad y orden en todo momento, así como entender que son parte de las expectativas del trabajo. Implementar auditorías para asegurar que los trabajos se lleven a cabo con seguridad, orden y limpieza.

### 5.7.12. Terminar y Verificar el Trabajo del Paro

Completar el trabajo programado, verificar que todas las condiciones en el equipo sean adecuadas para el arranque y documentar el sistema de administración de cambios hechos en los equipos.

### 5.7.13. Preparación para el Arranque

Preparar los sistemas para el arranque y mantener la supervisión adecuada para buscar anomalías antes de arrancar.

## 6. PAROS POR TRANSICIONES

El concepto de tiempo de transición se define cuando en la misma línea de producción es necesario manufacturar diferentes productos. Se define como tiempo de transición al intervalo de tiempo transcurrido entre la última unidad producida en una corrida y la primera unidad producida de la siguiente corrida, cumpliendo todos los estándares de calidad.

En el pasado, las mejoras en transiciones se alcanzaban mediante personas más capacitadas para realizar el trabajo y lotes grandes de producción, con ésto se introdujo el concepto de lote económico para contrarrestar el efecto del incremento de inventarios como se puede observar en la figura 57.

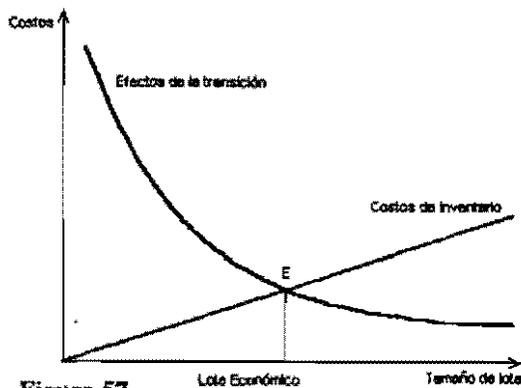


Figura 57

Sin embargo aún existe un punto importante sin analizar en cuanto al concepto de lotes económicos, la suposición de que es imposible lograr drásticas reducciones en los tiempos de transición, si esto pudiera ser posible, el concepto de lote económico perdería toda validez y podríamos tener mayor flexibilidad en la producción y una respuesta más rápida a las necesidades del cliente.

La tecnología que se utiliza para éste fin es la llamada SMED surgida en 1969 en las fábricas de autos de Toyota en Japón y desarrollada por Shigeo Shingo. La tecnología toma el nombre de SMED (*Single Minute Exchange of Die*) por su primera aplicación, que fue la de reducir el tiempo de montaje de un dado en una prensa muy grande. Estos principios pueden transferirse a muchos procesos, donde las transiciones y los paros son necesarios.

### 6.1. OPERACIONES INTERNAS Y EXTERNAS

Una operación es una serie de actividades relacionadas para lograr un fin. Existen dos tipos diferentes de operaciones en una transición, las internas y las externas. Es muy importante reconocerlas para poder reducir los tiempos de transición.

Las operaciones Internas son aquellas que solo pueden realizarse cuando el proceso o la máquina esté parada.

Las operaciones externas son aquellas que pueden ser realizadas cuando el proceso o máquina está trabajando.

## **6.2. DOCUMENTAR LOS DETALLES DE UN PROCESO DE TRANSICIÓN**

La primera etapa en la mejora de un proceso de transición es documentar los detalles del proceso actual, para lo cual se deberá identificar el proceso de transición, listar todas las actividades que comprenden la transición y el tiempo de realización de cada una, así como registrar detalles y hechos observados.

## **6.3. IDENTIFICAR Y SEPARAR OPERACIONES INTERNAS Y EXTERNAS**

Se deberán identificar todas las actividades como internas o externas según sea el caso y de ésta manera se podrán separar las internas de las externas. Las internas se alinean de manera que serán éstas las que determinen el tiempo que requerirá estar detenida la línea de producción.

## **6.4. REMOVER OPERACIONES Y ACTIVIDADES EXTERNAS**

La segunda etapa en la mejora de un proceso de transición consiste en remover las operaciones externas que actualmente se realizan con el proceso parado y pueden realizarse con el proceso trabajando, para esto se deberán seguir los siguientes pasos:

1. Diferenciar operaciones internas y externas.
2. Separar las actividades internas y externas de una operación.
3. Remover operaciones y actividades externas fuera del proceso de transición tanto como sea posible.
4. Alinear las actividades internas de manera que se optimice y reduzca aún más el tiempo.
5. Alinear y optimizar las actividades externas de modo que se reduzca el costo, el tiempo y la energía.

### **6.4.1. Ideas Prácticas**

Listas de verificación. Contar con todas las especificaciones, repuestos, herramientas y condiciones de operación como presión, temperatura, intensidad de corriente, esto con el objetivo de hacer las cosas bien a la primera vez y que se cuente con todo lo necesario antes de parar la máquina, evitando así errores y corridas de prueba.

Verificaciones funcionales. Verificar que todo trabaje correctamente y en dado caso de presentarse alguna falla, poder corregirla antes de que comience la transición y evitar que las actividades internas se interrumpan.

Mejorar el transporte de partes y herramientas del almacén a las máquinas y de regreso.

## 6.5. CONVERTIR OPERACIONES INTERNAS EN EXTERNAS

La transferencia de operaciones internas a externas es el siguiente concepto básico para continuar con la reducción de tiempos de transición. Esta etapa normalmente requiere capital e ingenio. Técnicas para calentar los componentes, para fijar rápidamente piezas, automatizar procesos de cambio. Se deberán seguir los siguientes pasos:

1. Analizar lo que se hace en el proceso de transición.

Los miembros del proceso adoptarán una actitud crítica para evitar que algo acerca del proceso de transición sea dado por hecho. Inicialmente se analizarán los “5 ¿Porqués?” de la transición completa y después de cada actividad de la transición.

### LOS “5 ¿PORQUÉS?”

- ¿CUÁL es el propósito?, ¿Es necesaria esta actividad?, ¿Puede ser eliminada?. El objetivo de esta pregunta es eliminar actividades innecesarias.
- ¿DÓNDE se hace esto?, ¿Porqué tiene que ser hecho en este lugar?, ¿Dónde debería hacerse?. El objetivo de esta pregunta es combinar o cambiar el lugar donde se realizan las actividades.
- ¿CUÁNDO debe hacerse?, ¿Porqué hacemos esto en esta secuencia en relación con las otras cosas?, ¿Cuándo debería hacerse?. El objetivo de esta pregunta es combinar o cambiar la secuencia de tiempo de las actividades.
- ¿QUIÉN esta haciendo esto?, ¿Porqué lo está haciendo la persona?, ¿Quién debería hacerlo?. El objetivo de esta pregunta es combinar o cambiar a las personas que realizan la actividad.
- ¿CÓMO se hace esto?, ¿Porqué lo estamos haciendo de esta manera?, ¿ Existe alguna forma más simple y mejor de hacerlo y alcanzar los resultados?, ¿Cómo debería hacerse?. El objetivo de esta pregunta es simplificar o mejorar el método de realizar las actividades.

2. Idear como convertir a externas operaciones que actualmente son internas.

Ya que conocemos el porqué de cada actividad, debemos considerar las formas para convertir en externas aquellas actividades que ahora son internas. Los miembros del proceso deberán escribir sus ideas y propuestas tomando en cuenta el análisis anterior y considerando las consecuencias de los cambios propuestos y el posible impacto sobre el resto de las actividades.

3. Idear como alinear/optimar las operaciones internas.

4. Idear como alinear/optimar las operaciones externas.

5. Decidir que ideas se adoptarán y probarán.
6. Preparar y ejecutar el siguiente proceso de transición utilizando las nuevas ideas.
7. Documentar los cambios realizados y los nuevos procedimientos.

Deberá registrarse el tiempo total de la transición así como las observaciones y el tiempo utilizado en cada actividad. También es importante que se documente el nuevo procedimiento y se entrene al personal en caso necesario.

Todos los pasos deberán realizarse en forma cíclica con el fin de lograr la mejora continua del proceso de transición.

Habrá que tomar en cuenta que el tiempo que tomará en terminar las operaciones externas determinará la frecuencia de las transiciones de producto, si el tiempo requerido para las operaciones externas es mayor a la corrida de producción más corta, la máquina tendrá que detenerse.

### 6.5.1. Ideas Prácticas

Preparar de antemano las condiciones de operación. Pensar en formas de como avanzar los preparativos de cualquier operación interna, como por ejemplo pre-calentar los dados.

Estandarizar las funciones. Estandarizar las partes que sus funciones son necesarias desde el punto de vista de la transición como el dimensionado, centrado, asegurado, expulsión. La figura 58 muestra un ejemplo de esto.

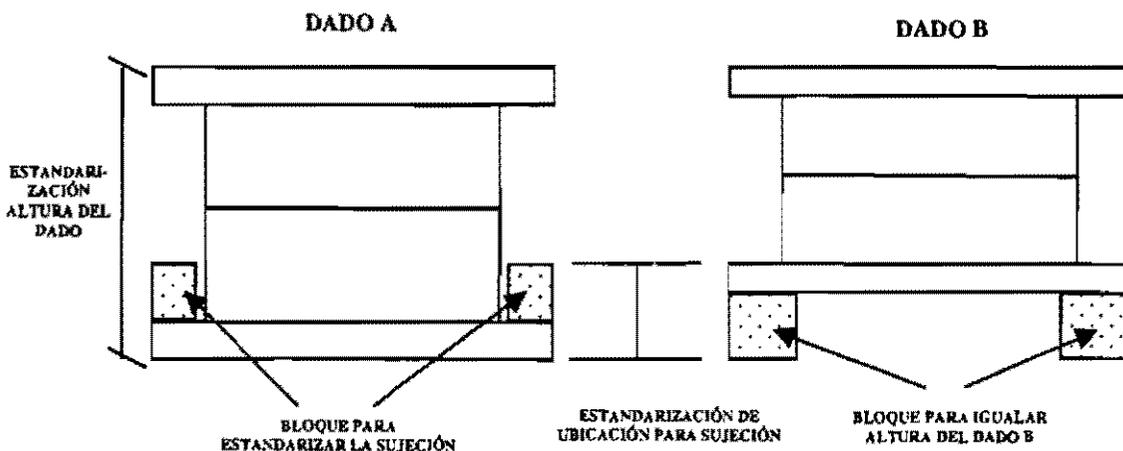


Figura 58

Utilizar equipo intermedio para la transición. En lugar de instalar y hacer la transición sobre la máquina que se encuentra procesando, hacer los ajustes en una plataforma o pieza de repuesto para acortar los tiempos internos.

Utilizar Fijaciones funcionales. Métodos para fijar como los de una sola vuelta, un solo movimiento o interlockeo. La figura 59 muestra algunos ejemplos de estos conceptos.

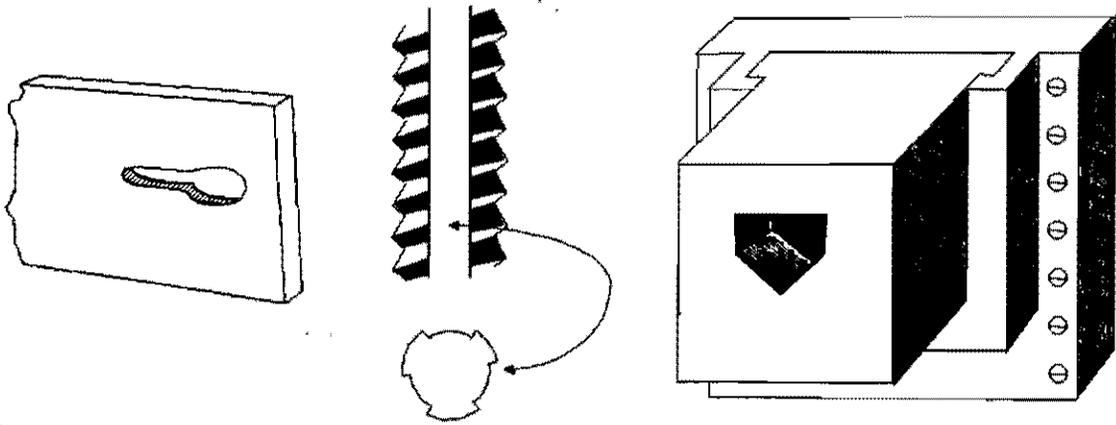


Figura 59

## 7. CONCLUSIONES

A lo largo de éste trabajo nos hemos enfocado en el proceso de mejorar la capacidad productiva de las instalaciones manufactureras mediante varias metodologías que ha mostrado ser muy efectiva y relativamente simple. Estas dos características son importantes para tener éxito en su implantación industrial, ya que es fundamental permitir que todos los trabajadores se enfoquen en una meta clara de alcanzar, y con metodologías efectivas.

La base de esta metodología es la de eliminar defectos en el proceso de manufactura. Defectos que, como hemos visto, provienen de todos los departamentos y procesos industriales y que terminan reflejándose en el proceso mismo de manufactura.

Dos tecnologías (o metodologías) de amplio espectro, para mí conocidas, se enfocan en el proceso de eliminación de defectos: "Six Sigma" o traduciendo, Seis Sigma, y esta del "Overall Equipment Efficiency" (OEE). Desde mi particular punto de vista la ventaja del OEE es, a diferencia de la de Seis Sigma, que no es un proceso aleatorio o probabilístico de búsqueda. Por otro lado, y en favor de la metodología de Seis Sigma, es que esta última es aplicable incluso a procesos transaccionales.

En especial hemos visto la forma de enfocarse y resolver pérdidas por paros programados, por paros no programados, pérdidas por transición, quedando para un futuro hablar de pérdidas por calidad. Dentro de algunas variaciones del OEE, de origen japonés, las pérdidas por paros no programados también se clasifican en paros no programados menores y paros no programados mayores, donde el impacto de los primeros es la gran importancia que tienen en plantas altamente automatizadas, aún cuando la metodología a aplicar es esencialmente la misma.

Se presentó un capítulo acerca de la eliminación de defectos, del análisis de causa raíz, y de cómo determinar las causas básicas raíces. Por simple que parezca, el proceso a seguir es un proceso grupal que tiene la virtud de integrar diferentes visiones y diferentes habilidades y especialidades para resolver problemas que a veces son sencillos, a veces muy elaborados, pero en todas las ocasiones es una aplicación básica de la relación causa – efecto.

El principio de causalidad o causa – efecto, como bien sabemos, es la base del conocimiento científico. Sin embargo la humanidad tardó siglos en descubrir la forma de aplicarlo en forma sistemática, de generar experimentos para descubrir esta causalidad. Creer en la causalidad significa, que a todo efecto negativo superior en su daño a cierto límite que se presente en el medio industrial, se tiene una irreductible decisión de analizarlo. Esto debe ser la práctica normal. Sin embargo la realidad del medio industrial mexicano, y se ha mostrado que incluso en países más avanzados, es que no se aplica esta metodología para eliminar fallas y defectos en la maquinaria para mantener y mejorar su productividad. Esa ha sido la fortaleza de la cultura manufacturera japonesa. Me refiero a aplicar el análisis de causa raíz al nivel de los hechos y no de las palabras. Prácticamente

ninguna empresa mantiene grupos de eliminación de defectos que lo mismo mejoren la productividad de las instalaciones que la calidad de los productos (defectos producidos por los defectos de la maquinaria al entrar en contacto con la materia prima).

Hemos permanecido lejos del aspecto económico de los beneficios derivados de la aplicación sistemática de los conceptos enunciados a lo largo de la tesis. De hecho se pensará que muchos conceptos de estas metodologías o tecnologías no tienen aplicación. Y nada más lejos de la realidad. La siguiente tabla puede ser un resumen que ilustra los beneficios de aplicar sistemática y consistentemente estas tecnologías.

| Concepto     |   |
|--------------|---|
| Producción   | 140% aumento de la capacidad productiva.<br>17% aumento de la tasa de producción.<br>98% reducción de paros no programados. |
| Calidad      | 90% reducción de defectos en el proceso.<br>70% reducción de defectos.<br>50% reducción de reclamaciones de clientes.       |
| Costo        | 30% reducción de la fuerza laboral.<br>30% reducción de costos de mantenimiento.<br>30% conservación de energía.            |
| Distribución | 50% reducción de días de inventario.  |
| Seguridad    | Cero accidentes.<br>Cero contaminación.   |
| Moral        | 230% incremento de ideas de mejora.<br>200% incremento de reuniones para mejoras.   |

Piénsese tan solo en el aumento de capacidad productiva. La tabla anterior muestra un potencial típico de 140% para la mayoría de las empresas. En la empresa en la que hemos aplicado estos conceptos<sup>3</sup> hemos incrementado la capacidad productiva en más de 180%, y otras plantas de la misma empresa reportan aumentos del 200% con relativa frecuencia.

Piénsese en alguna de las grandes empresas paraestatales de México. Tan solo proponerse aumentar en 10% la capacidad de producción de petróleo o de electricidad, con el ánimo de ser conservador en los alcances de estas tecnologías, estaríamos hablando de muchos millones de dólares. Algunas de estas tecnologías están cubiertas bajo el denominado "Total Productive Maintenance", y la importancia de ellas ha sido reconocida a nivel de países<sup>4</sup>, y mucho de la competitividad japonesa en el mercado se debe a esta iniciativa que de una u otra manera ha estado ligada a los programas de calidad total (TQM), y lo que se presenta en esta tesis es, en parte, una visión occidentalizada de estas estrategias.

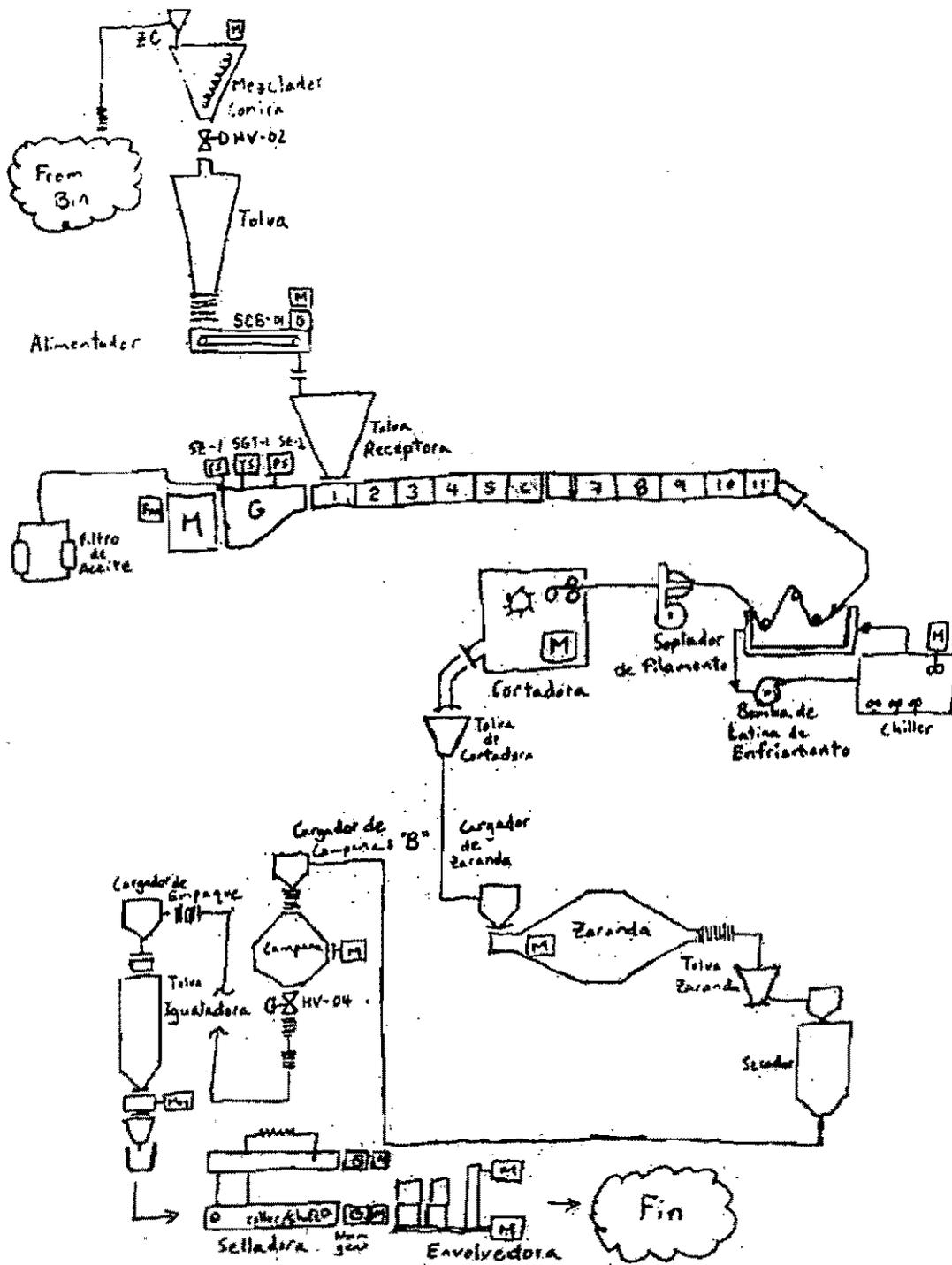
La palabra "ingeniería" tiene varios orígenes. Uno de ellos viene de la palabra inglesa "engine", y el ingeniero es el "engineer". Esto es, el hombre que está al lado de las máquinas, las vigila, las cuida y las hace producir. De modo que el tema de esta tesis, la de

<sup>3</sup> Planta de Polímeros, Tlalnepantla, propiedad de DuPont S.A. de C.V.

<sup>4</sup> Premio TPM Japonés.

aumentar la capacidad productiva de la mejor manera, cuidando el binomio hombre – maquina, tanto desde el punto de vista laboral como desde el punto del servicio al servicio mismo del hombre y sus necesidades, es un tema que no puede estar más cerca del corazón del ingeniero.

## 8. APÉNDICE A) DETERMINANDO EL PLAN APROPIADO DE MANTENIMIENTO



| RCM II<br>HOJA DE TRABAJO<br>DE INFORMACION |  | SISTEMA<br><i>Tehuacan Plant</i> |   | Nº<br>8                         | Revisado por<br>John L.J.  | Fecha<br>17-Aug-00                         | Hoja<br>7  |
|---|--|----------------------------------|---|---------------------------------|--|--|--|
| SUB-SISTEMA                                 |  | Ref.<br>Tehuacan Plant           |   | Revisado por                    | Fecha  | de<br>47                                   |   |
| FUNCION                                     |  | FALLO FUNCIONAL                  |   | MODO DE FALLO (Causa del fallo) |  | EFECTO DEL FALLO (Qué ocurre cuando falla) |  |
| 1   | Producir 2200 lb por hora de Zytel® en forma segura. | A                                | No producir 2200 lb por hora de Zytel® en forma segura. | 1                               | Manguera cargadora colapsada.  | 1  | Cuando la manguera falla la bomba puede cavitar embudo ruido, el operador debe de escuchar al sonido y comenzar una investigación. El tiempo de reparación debe ser 0.5 hr y habrá un paro de proceso de 1 hr. |
| 1   |  | A                                |   | 2                               | Tubería 1 de metal del mezclador conico falla por uso y por el tiempo. | 1  | El vacío disminuye en el sistema el operador notara el menor rendimiento para solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 4 hr y habrá un paro de proceso de 4.5 hr.                                     |
| 1   |  | A                                |   | 3                               | Cargador del mezclador conico falla por erosión y fricción             | 1  | El vacío disminuye en el sistema el operador notara el menor rendimiento para solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 1 hr y habrá un paro de proceso de 1.5 hr.                                     |
| 1   |  | A                                |   | 4                               | Tubería 2 de metal del mezclador conico falla por uso y por el tiempo. | 1  | El vacío disminuye en el sistema el operador notara el menor rendimiento para solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 4 hr y habrá un paro de proceso de 4.5 hr.                                     |
| 1   |  | A                                |   | 5                               | El interruptor de nivel LS13 falla por la válvula solenóide.           | 1  | Se activara el interlock de la bomba de vacío. El operador debe notar la situación y solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 0.5 hr y habrá un paro de proceso de 1.25 hr.                           |
| 1   |  | A                                |   | 6                               | El interruptor de nivel LS12 falla por desgaste de los cables.         | 1  | Se activara el interlock de la bomba de vacío. El operador debe notar la situación y solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 0.5 hr y habrá un paro de proceso de 1.25 hr.                           |
| 1   |  | A                                |   | 7                               | El interruptor de nivel LS12 falla por controlador electrónico.        | 1  | Se activara el interlock de la bomba de vacío. El operador debe notar la situación y solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 0.5 hr y habrá un paro de proceso de 1.25 hr.                           |
| 1   |  | A                                |   | 8                               | En el interruptor de nivel LS12 el brazo falla por fatiga o esfuerzo.  | 1  | Se activara el interlock de la bomba de vacío. El operador debe notar la situación y solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 0.5 hr y habrá un paro de proceso de 1.25 hr.                           |
| 1   |  | A                                |   | 9                               | El interruptor de nivel LS13 falla por la válvula solenóide.           | 1  | Se activara el interlock de la bomba de vacío. El operador debe notar la situación y solicitar ayuda. El tiempo de reparación debe ser 0.5 hr y habrá un paro de proceso de 1.25 hr.                           |

| RCM II<br>HOJA DE TRABAJO |    | SISTEMA<br><i>Tehuacan Plant</i> |   | Nº<br>8      | Revisado por<br>John L.J. | Fecha<br>17-Aug-00 | Hoja<br>7  |                 |                |    |    |   |   |          |                 |
|---------------------------|----|----------------------------------|---|--------------|---------------------------|--------------------|--|-----------------|----------------|----|----|---|---|----------|-----------------|
| SUB-SISTEMA               |    | Ref.<br>Tehuacan Plant           |   | Revisado por | Fecha                     | de<br>19           |  |                 |                |    |    |   |   |          |                 |
| Información               |    | Consecuencia evaluación          |   | Afecto de    |                           | Proposed Task      |  | Intervalo (mes) | A realizar por |    |    |   |   |          |                 |
| P                         | FE | MF                               | H | S            | E                         | O                  | SI   | NO              | HA             | NS | SA |   |   |          |                 |
| 1                         | A  | 1                                | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | S              | N  | N  | S | Reemplazar la manguera cargadora de la línea de carga del mezclador conico.                   | 1 Month  | Mecánico        |
| 1                         | A  | 2                                | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | N              | N  | N  | S | Sin mantenimiento programado.   |          |                 |
| 1                         | A  | 3                                | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual interna del cargador del mezclador conico.                                  | 3 Months | Operador        |
| 1                         | A  | 4                                | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | N              | N  | N  | S | Sin mantenimiento programado.   |          |                 |
| 1                         | A  | 5                                | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del contacto cada transición en el interruptor LS12.                        | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 6                                | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual de los cables cada transición en el interruptor LS12.                       | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 7                                | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | N              | N  | N  | S | Sin mantenimiento programado.   |          |                 |
| 1                         | A  | 8                                | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | S              | S  | S  | S | Reemplazar el ensamble de las espes en el interruptor LS12.                                   | 1 Year   | Instrument Tech |
| 1                         | A  | 9                                | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del contacto cada transición en el interruptor LS13.                        | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 10                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual de los cables en el interruptor LS13.                                       | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 11                               | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | N              | N  | N  | S | Sin mantenimiento programado.   |          |                 |
| 1                         | A  | 12                               | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | S              | S  | S  | S | Reemplazar el ensamble de las espes en el interruptor LS12.                                   | 1 Year   | Instrument Tech |
| 1                         | A  | 13                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del tornillo del papalote en el mezclador conico.                           | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 14                               | S | N            | N                         | S                  | N  | S               | S              | S  | S  | S | Apretar el tornillo del papalote del mezclador conico.  | 6 Months | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 15                               | S | N            | N                         | S                  | N  | S               | S              | S  | S  | S | Cambiar los sellos del papalote del mezclador conico.   | 2 Months | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 16                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del plato del papalote del mezclador conico.                                | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 17                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del tornillo del papalote 2 en el mezclador conico.                         | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 18                               | S | N            | N                         | S                  | N  | S               | S              | S  | S  | S | Apretar el tornillo del papalote 2 del mezclador conico.                                      | 6 Months | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 19                               | S | N            | N                         | S                  | N  | S               | S              | S  | S  | S | Cambiar los sellos del papalote 2 del mezclador conico.                                       | 2 Month  | Mecánico        |
| 1                         | A  | 20                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del plato del papalote 2 del mezclador conico.                              | 2 Weeks  | Operador        |
| 1                         | A  | 21                               | S | N            | N                         | S                  | N  | S               | S              | S  | S  | S | Reemplazar la manguera debajo del cargador del mezclador conico.                              | 1 Month  | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 22                               | S | N            | N                         | S                  | N  | S               | S              | S  | S  | S | Reemplazar la manguera 2 debajo del cargador del mezclador conico.                            | 1 Month  | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 23                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Inspeccion visual del mezclador conico.   | 5 Years  | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 24                               | S | N            | N                         | S                  | S  | S               | S              | S  | S  | S | Revisar la vibración en el balero del tornillo del mezclador conico del motor de circulación. | 6 Months | Mecánicos       |
| 1                         | A  | 25                               | S | N            | N                         | S                  | N  | N               | N              | N  | N  | S | Sin mantenimiento programado.   |          |                 |

## 9. APÉDICE B) RUTA CRÍTICA ÓPTIMA: RESULTADOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL MEDIANTE EXCEL: SOLVER®

Microsoft Excel - optimización para prom...

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

100%

|    | A         | B      | C     | D      | E     | F         | G        | H        | I      | J     | K |
|----|-----------|--------|-------|--------|-------|-----------|----------|----------|--------|-------|---|
| 1  |           |        |       |        |       |           |          |          |        |       |   |
| 2  |           |        |       |        |       |           |          |          |        |       |   |
| 3  | Actividad | Normal |       | Crash  |       | Gradiente | Tiempo   | Costo    | Final  |       |   |
| 4  | (0,1)     | Tiempo | Costo | Tiempo | Costo | Costo     | Reducido | Inducido | Tiempo | Costo |   |
| 5  | (0,2)     | 4      | 210   | 3      | 280   | 70        | 0        | 0        | 4      | 210   |   |
| 6  | (1,2)     | 8      | 400   | 6      | 560   | 80        | 0        | 0        | 8      | 400   |   |
| 7  | (1,4)     | 6      | 500   | 4      | 600   | 50        | 2        | 100      | 4      | 600   |   |
| 8  | (2,3)     | 9      | 540   | 7      | 600   | 30        | 0        | 0        | 9      | 540   |   |
| 9  | (2,4)     | 4      | 500   | 1      | 1100  | 200       | 0        | 0        | 4      | 500   |   |
| 10 | (3,5)     | 5      | 150   | 4      | 240   | 90        | 0        | 0        | 5      | 150   |   |
| 11 | (4,5)     | 3      | 150   | 3      | 150   | 0         | 0        | 0        | 3      | 150   |   |
| 12 | (4,5)     | 7      | 600   | 6      | 750   | 150       | 1        | 150      | 6      | 750   |   |
| 13 | Total     |        | 3050  |        | 4260  |           | 3        | 250      |        | 3300  |   |

| Ruta      | Tiempo |       |
|-----------|--------|-------|
|           | Normal | Final |
| 0-1-2-4-5 | 22     | 19    |
| 0-1-2-3-5 | 17     | 15    |
| 0-1-4-5   | 20     | 19    |
| 0-2-4-5   | 20     | 19    |
| 0-2-3-5   | 15     | 15    |
| Duración  | 22     | 19    |

**Solver Parameters**

Set Target Cell to:

Equal To:  >=  <=  <  >  <=  > Value of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

- =
- =
- <=
- = integer
- >=
- <=

Ready

Microsoft Excel - opt...

12:13 PM

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

## **10. APÉNDICE C) EFECTOS DE LAS FALLAS Y TÉCNICAS PARA DETECTARLAS**

### **10.1. EFECTOS DINÁMICOS**

Los efectos dinámicos se caracterizan por la emisión de energía en forma de ondas, ya sean vibraciones, pulsos o ruidos. Estos pueden presentarse debido a problemas de desbalanceo, desalineación, desajuste, fatiga, desgaste, cavitación, defectos en rodamientos, engranes y poleas.

La mayoría de los equipos que presentan este tipo de efectos es debido a que contienen piezas reciprocantes que pueden vibrar a diferentes frecuencias. Estas frecuencias están relacionadas a las fuentes de vibración y cada componente de los equipos tiene diferentes características, por lo que emite vibraciones diferentes. Por ejemplo, las frecuencias de vibración de una caja de engranes están compuestas por las frecuencias de vibración de las flechas, los dientes de los engranes, los baleros, etc.

El análisis de vibraciones es una técnica de monitoreo que nos permite detectar problemas dinámicos, éste mide cuanto vibra el equipo y después mediante técnicas analíticas como el análisis de Fourier, mide la vibración de cada componente del equipo por separado para detectar si algo ha cambiado en las características de vibración, lo cual en dado caso de presentarse, indicaría el comienzo de una falla.

Cuatro características diferentes de las ondas determinan los diferentes tipos de análisis de vibraciones, la amplitud, la frecuencia, la fase y la aceleración.

### **10.2. EFECTOS POR AGENTES EXTERNOS**

Los agentes externos están constituidos por partículas sólidas y elementos químicos generados por el desgaste, fatiga, corrosión, degradación, filtración y exposición al medio ambiente.

En el caso de las partículas sólidas, éstas pueden entrar en contacto directo con los componentes, desgastándolos o bloqueándolos debido a la acumulación de partículas. En el caso de los elementos químicos, éstos pueden corroer componentes, bloquear ductos y cambiar las propiedades de los lubricantes, grasas y fluidos vitales para el funcionamiento del equipo.

Existen varias técnicas para detectar y monitorear los avances de los problemas ocasionados debido a los agentes externos, como son los análisis ferrográficos y los análisis de fluidos que consisten en analizar sus propiedades físicas, su composición química y el contenido de partículas sólidas.

### **10.3. EFECTOS TÉRMICOS**

Los efectos térmicos se caracterizan por el aumento de la temperatura en ciertos componentes de los equipos debido a discontinuidades en sistemas eléctricos y de tuberías, deterioro de aislamientos, sobrecarga eléctrica y fricción excesiva.

La termografía es una técnica de monitoreo que mide la radiación emitida por una superficie en tiempo real, produciendo una imagen visible de la radiación infrarroja. Se basa en el principio de que todos los objetos con temperatura sobre el cero absoluto emiten radiación infrarroja proporcionalmente a su temperatura.

### **10.4. EFECTOS FÍSICOS**

Los efectos físicos se caracterizan por cambios en la apariencia física o estructura de los componentes de un equipo, presenciándose discontinuidades en las superficies y cambios de dimensiones. Estos efectos se presentan debido a problemas de fatiga, desgaste, corrosión, dilatación, inclusiones y soldaduras.

Existen varias técnicas para detectar estos efectos, como por ejemplo, las que utilizan líquidos fluorescentes penetrantes, ultrasonido, corrientes Eddy, radiografías, etc..

## 11. BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS

ANTILL, J.M., R.W. Woodhead, *Método de la Ruta Crítica y sus Aplicaciones a la Construcción*, Editorial Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, México, 1994.

BENTLEY, J.P., *Introduction to Reliability and Quality Engineering*, 2d Ed., Addison-Wesley, England, 1999.

BLOCH, H.P., F.K. Geitner, *Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*, 3d Ed., Gulf Publishing Company, Houston, 1994.

CARTER, A.D.S., *Mechanical Reliability and Desig*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1997.

CATALYTIC CONSTRUCTION COMPANY, *Método del Camino Crítico*, Editorial Diana, México, 1989.

DETMER, H.W., *Goldratt's Theory of Constraints: A System Approach to Continuous Improvement*, ASQC Quality Press, Wisconsin, 1997.

FEDERAL ELECTRIC CORPORATION, *El Método PERT*, 2a Ed., Ciencia y Técnica S.L., Madrid, 1969.

GALSWORTH, G.D., *Visual Systems: Harnessing the Pwer of the Visual Workplace*, AMACOM, New York, 1997.

GOLDRATT, E.M., *Critical Chain*, The North River Press, Massachusetts, 1997.

HANSEN, R.C., "Unleashing the Power of OEE", *Maintenance Technology*, pg.12, May 1998.

IRESON, W.G., C.F. Coombs, R.Y. Moss, *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2d Ed., McGraw-Hill, New York, 1995.

KAPUR, K.C., L.R. Lamberson, *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1977.

LEFLAR, J.A., *Practical TPM: Successful Equipment Management at Agilent Technologies*, Productivity Inc., Oregon, 2001.

MODER, J.J., C.R. Phillips y E.W. Davis, *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming*, 3d Ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1983.

MOUBRAY, J., *Reliability-Centered Maintenance*, 2d Ed., Industrial Press Inc., New York, 1997.

NAKAJIMA, S., *Introduction to TPM*, Productivity Press, Massachusetts, 1988.

NELMS, C.R., *The Dynamics of Inculcating the Root Cause Mentality: Organizational and Personal Changes Which Must Occur to Enable True Root Cause Discovery*, Failsafe Network Inc., Richmond, 1995.

NELMS, C.R., *What You Can Learn From Things That Go Wrong: A Guidebook to the Root Causes of Failure*, Failsafe Network Inc., Montebello, 1994.

RAO, S.S., *Reliability – Based Design*, Mc Graw-Hill, New York, 1992.

RUSKIN, A.M., W.E. Estes, *What Every Engineer Should Know About Project Management*, Marcel Dekker Inc., New York, 1982.

SHINGO, S., *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*, Productivity Press, Massachusetts, 1985.

SUZUKI, T., *TPM in Process Industries*, Productivity Press, Oregon, 1994.

### ***CURSOS***

Managing Efficient Shutdowns and Turnarounds, Strategic Approaches for Enhanced Performance. Project Assurance, Houston Texas. 1999.

Reliability Engineering Principles. Barringer & Associates, Inc, Humble Texas. 1999.