

## ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD APLICADO A UNA CONFORMADORA DE ROLLOS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE MODOS DE FALLO

Reliability analysis applied to a roll forming machine using the failure modes technique

### RESUMEN

Se muestra la ejecución de un análisis de confiabilidad en una conformadora de rollos de una empresa papelera.

En el mantenimiento clásico es vital conocer las características y el estado de una máquina con el fin de anticipar una falla y con ello prever daños y pérdidas. Lo anterior está limitado por la experiencia de quien ejecuta las labores de mantenimiento, por lo que se debe llevar un registro de fallas y tiempos de mantenimiento para realizar un análisis de confiabilidad que permita estimar sin necesidad de los operarios el tiempo aproximado en el cual fallará un componente del sistema.

**PALABRAS CLAVES:** Confiabilidad, Diagramas de bloque, FMEA, Modos de fallo, RPN.

### ABSTRACT

*This paper shows the implementation of a reliability analysis in a roll forming machine for a paper company.*

*For classic maintenance is vital to know the characteristics and state of a machine in order to predict a failure, and avoid damages, and losses. This is limited by the experience of those who implement the maintenance work. These workers must keep records of failures and maintenance times for making a reliability analysis for estimating, without the need of operators, the time in which a component system should fail.*

**KEYWORDS:** Block diagrams, Failure modes, FMEA, Reliability, RPN.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de un grupo de mantenimiento en una empresa es el de garantizar el funcionamiento correcto y continuo de todas las líneas de producción; para cumplir con este propósito, se pueden elaborar planes desde los más simples y básicos hasta los más elaborados y sistematizados.

En mantenimiento clásico, es de vital importancia conocer las características y el estado de operación de una máquina en su totalidad; gracias a este conocimiento en algunos casos es posible anticiparse a la falla y con ello prever daños que a futuro ocasionarían pérdidas en producción que se reflejarían en costos. Lo anterior está limitado por la experiencia de quien ejecuta las labores de mantenimiento, lo cual hace al sistema dependiente, y no se tendría certeza de si el comportamiento de la máquina es correcto o incorrecto. De ahí la importancia de llevar un registro de fallas y tiempos de mantenimiento, y con estos datos históricos realizar un análisis de confiabilidad para estimar sin necesidad de la experiencia de un operador o personal de mantenimiento el tiempo aproximado en el cual fallará un componente del sistema [8].

### JULIÁN ANDRÉS TASAMA V.

Ingeniero Electricista  
Universidad Tecnológica de Pereira  
juantava@gmail.com

### SANTIAGO GÓMEZ ESTRADA

Ingeniero Electricista  
Docente Transitorio  
Universidad Tecnológica de Pereira  
sangomez@gmail.com

### MAURICIO HOLGUÍN L.

Ingeniero Electricista, M.Sc (C)  
Docente Transitorio  
Universidad Tecnológica de Pereira  
ma\_hol@ohm.utp.edu.co

Apoyados en una base de datos, se realizará un análisis estadístico de confiabilidad utilizando la técnica de modos de fallos en la conformadora de rollos de una empresa papelera, para estimar el tiempo de falla de las diferentes partes del sistema, con el objetivo de aumentar la disponibilidad de los componentes, ya que con la información entregada por el análisis se pueden tomar las medidas necesarias para realizar las labores pertinentes y a tiempo para asegurar la disponibilidad fuera de una operación continua, eficaz y con calidad de la máquina en estudio.

## 2. ANALISIS DE MODOS DE FALLO Y CONFIABILIDAD

### 2.1. FMEA

El análisis de modos y efectos de fallo FMEA, se entiende como una metodología sistemática que se emplea para analizar problemas potenciales de confiabilidad durante el ciclo de vida de un componente, equipo o sistema; este permite identificar modos de fallo potenciales y su efecto sobre la operación del sistema;

facilita la toma de decisiones, permite anticiparse a las fallas y si estas ocurren puedan ser superadas rápidamente, todo lo anterior hace que esta metodología contribuya al aumento de la confiabilidad [1, 2].

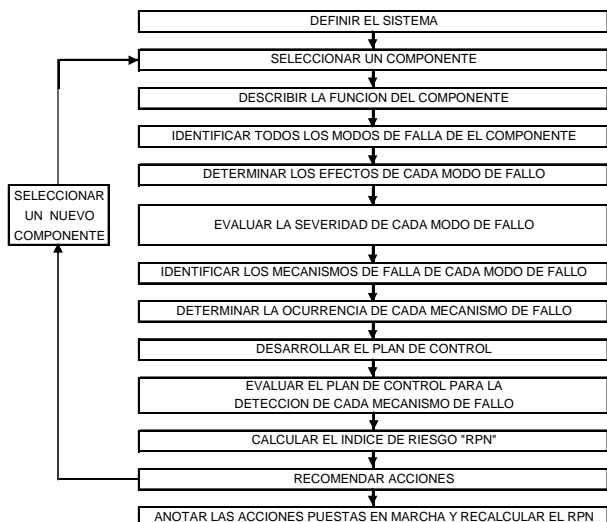


Figura 1. Diagrama de bloques para realizar el Análisis de modos de fallas (FMEA)

**2.2. FTA**

El FTA es un método deductivo que presenta características excelentes a la hora de localizar, corregir y anticiparse a las fallas. Para llevarlo a cabo, el método parte de definir un suceso no deseado, evento o falla que se pretenda evitar y a partir de él se identifican todos los factores que puedan desencadenar el posible suceso. Gráficamente todo esto queda expresado en el árbol de falla, todas las combinaciones se logran a través de operadores lógicos (Puertas Y, Puertas O, Puerta Y prioritaria, Puerta O exclusiva, etc.) y las operaciones están definidas por el álgebra de Boole. Para implementar el FTA es recomendable seguir una serie de pasos, siendo estos [4, 7, 9]:

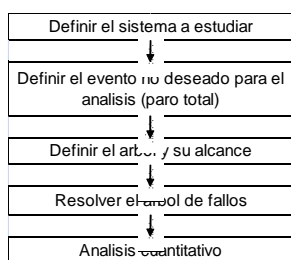


Figura 2. Algoritmo de cálculo de FTA

**2.3. DIAGRAMA DE BLOQUES**

**2.3.1. SISTEMA SERIE**

Un sistema serie desde el punto de vista de confiabilidad, es aquel en el cual todos los componentes deben

funcionar adecuadamente para que el sistema opere; es decir si uno de los componentes falla, el sistema falla[3].

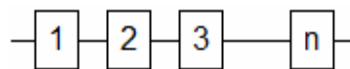


Figura 3. Sistema serie

Para un sistema serie, su confiabilidad cuando  $n$  elementos son independientes es:

$$R_s = P[E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n] = P[E_1]P[E_2] \dots P[E_n] = R_1R_2 \dots R_n \tag{1}$$

Donde  $R_1 \dots R_n$  son las confiabilidades individuales de los componentes 1, ...,  $n$

De manera general para  $n$  componentes independientes:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \text{Confiabilidad del Sistema}$$

$$Q_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) \quad \text{Probabilidad de Falla del Sistema} \tag{2}$$

Para  $R_s(t)$  se puede inferir que la confiabilidad conformada por  $n$  componentes individuales conectados en serie, siempre será menor que la confiabilidad del componente menos confiable.

**2.3.2. SISTEMA PARALELO**

Un sistema paralelo desde el punto de vista de confiabilidad, es aquel en el cual el funcionamiento adecuado de cualquiera de sus  $n$  componentes, implica la operación del sistema [3].

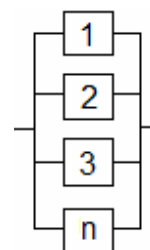


Figura 4. Sistema paralelo

Cabe anotar que en esta configuración para que el sistema falle deben fallar todos los  $n$  componentes.

$$Q_p = P[\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_n] = P[\bar{E}_1]P[\bar{E}_2] \dots P[\bar{E}_n] = Q_1Q_2 \dots Q_n \tag{3}$$

Donde:

$Q_n$ : Son las probabilidades de falla individuales de los componentes  $n$ -ésimos, generalmente son funciones del tiempo.

De manera general para un sistema de  $n$  componentes no reparables en paralelo se tiene:

$$\begin{aligned}
 Q_p(t) &= \prod_{i=1}^n Q_i(t) \\
 R_p(t) &= 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) \\
 R_p(t) &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Para  $R_p(t)$  se concluye, que la confiabilidad para un sistema en paralelo con  $n$  elementos independientes, crece con el aumento de los subconjuntos bajo estudio.

### 3. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA BASE DE DATOS

#### 3.1. ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

Utilizados para determinar el desempeño de un sistema, bloque operativo o componente, entre ellos se tienen: MTBF, MTTF, tasa de falla, etc [5].

A continuación se describirán los índices a emplear.

MTBF	Tiempo medio entre fallas	$\frac{\sum_{i=1}^{N_f} tbf_i}{N_f}$	Contiene solamente las salidas no planeadas que involucran falla en el componente.
MTTF	Tiempo medio para fallas	$\frac{\sum_{i=1}^{N_f} ttf_i}{N_f}$	Contiene solamente las salidas no planeadas que involucran falla para el componente.
MTTR	Tiempo medio para reparación	$\frac{\sum_{i=1}^{N_f} ttr_i}{N_f} = r$	Contiene solamente las restauraciones de salidas no planeadas que involucran falla en el componente.
$\Lambda$	Tasa de fallas	$\frac{N_f}{N * T - \sum_{i=1}^{N_f} ttr_i}$	Contiene todas las salidas no planeadas que involucran falla en el componente.

Tabla 1. Índices de Confiabilidad

#### 3.2. MODELOS DE CONFIABILIDAD

Para determinar el modelo que mejor describe la naturaleza de los datos se realiza un ajuste al histórico de mantenimiento para los datos de tiempos para salida y tiempos para reparación del componente y así obtener su función de probabilidad (Normal, Lognormal, Exponencial, Gamma, etc.) [5, 8].

## 4. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 4.1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para llevar a cabo el presente trabajo se utilizó la base de datos de la conformadora de rollos proporcionada por el grupo de mantenimiento de la empresa papelera, en ella se tiene el reporte diario de todos los eventos que se presentan, además se tiene la información ordenada de forma cronológica y contiene las fechas en las cuales se presenta la falla en cada componente y su tiempo de reparación. Los datos facilitados corresponden al período entre enero 1 de 2007 a abril 30 de 2008.

### 4.2. CONOCIMIENTO Y DEPURACIÓN

Con la información de eventos de fallos para la conformadora de rollos identificada, se procedió a separar ésta en función de los bloques operativos que la conforman. Posteriormente la información de cada bloque operativo se separó en función de sus componentes. Para ello, la conformadora se dividió en etapas operacionales asignándoles a ellas sus respectivos fallos. Una vez dividida y asignada la información se procedió a depurar la información de fallos, los datos inicialmente depurados son debidos a “Ajustes” que se presentaban debido a acciones que se realizaban sobre la marcha, queriendo decir esto que no eran resultado de una planeación de mantenimiento.

### 4.3. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Teniendo los datos que resultaron después del primer filtro, se realizaron dos procesos: el primero fue el cálculo de los índices de confiabilidad utilizando el software “configrupcomp.m” y el segundo fue el cálculo de los modelos de confiabilidad y la segunda depuración de los datos, los outliers tipo 2, que considera como ruido a aquellos datos que se apartan de tres veces la desviación estándar, para lo cual se empleó el software “datafit.m, datafit1.m, datafit2.m, datafit3.m y datafit4.m”, ambos desarrollados en MATLAB® [5].

### 4.4. OBTENCIÓN DE MODELOS

De acuerdo a las características operativas de la conformadora de rollos y con el apoyo del personal de mantenimiento de la empresa papelera, se definió el diagrama de bloques que describe el funcionamiento del sistema.

**5. RESULTADOS**

Inicialmente se contaba con 441 datos para el análisis; pero después de realizar la filtración de la base de datos solo 281 datos fueron útiles para el análisis y se presentan en la siguiente tabla.

Bloque	Datos iniciales	Outliers tipo 1	Outliers tipo 2	Datos Útiles
Perforadora	38	6	0	32
Cortadora	80	4	2	74
Omega 3	206	101	3	102
MW30	38	5	0	
PW20	75	38	0	37
PW30	4	1	0	3
<b>TOTALES</b>	<b>441</b>	<b>155</b>	<b>5</b>	<b>281</b>

Tabla 2. Datos para el análisis

El modelo utilizado para el cálculo de la confiabilidad del sistema es el siguiente.

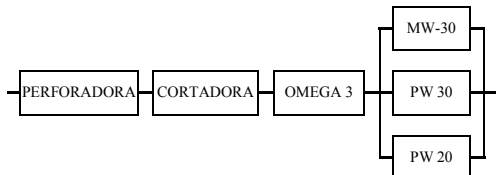


Figura 5. Diagrama de bloques conformadora de rollos

Con base en el diagrama de bloques y los modelos matemáticos de confiabilidad de cada elemento se obtiene la confiabilidad por bloques y la del sistema total para cualquier día del año.

Bloque	Elemento	Confiabilidad Individual	Confiabilidad por bloque
Perforadora	Acumulador	0,9423	69,19%
	Banda del jinetillo	0,9277	
	Cuchilla descoladora	0,9469	
	Rodajas	0,9535	
	Sistema de moletas	0,9631	
	Gofrador	0,9546	
	Sistema de transferencia	0,9535	
Cortadora	Sistema Cuchilla	0,9681	92,31%
	Freno Motor Principal	0,9565	
	Sistema Esmeril	0,4738	
	Motor Principal	0,9815	
	Torres	0,9831	
	Banda Transporte Salida	0,9565	
Omega 3	Banda Alimentación Rollo	0,9405	42,29%
	Sistema de Pinzas	0,9535	
	Seguidor de Leva y Tornillo Graduación	0,8509	
	Sistema de Vacío	0,6474	
	Embutidores	0,9794	
	Sistema Corte de Lámina	0,9754	
	Sistema Succión Bandas de los Tacos	0,9342	
	Sellador Base	0,9732	
Expulsor de Rollo	0,9652		

MW 30	Banda Transporte de Lámina	0,7165	56,21%
	Sellador Base	0,9529	
	Sistema Plegadores	0,9676	
	Sistema Cuchilla Corte Lámina	0,9535	
	Banda Dentada Lanzador	0,5488	
	Banda Doble Dentada 25 t5 x1930	0,7613	
PW 20	Sistema de Plegadores	0,9791	82,40%
	Alimentador de Rollos	0,925	
	Sellador Base	0,9346	
	Sistema de Corte	0,9772	
PW 30	Banda Transporte Lámina	0,5134	51,34%
<b>Confiabilidad de la conformadora de rollos</b>			<b>25,99%</b>

Tabla 3. Confiabilidad al cabo de un año de los elementos que conforman el sistema considerándolos al 100% en el día cero.

De los 34 elementos que conforman la maquina, al cabo de un año solo 4 presentan una confiabilidad inferior al 70,00% los cuales representan el 11,76% de los elementos, en lo que respecta a los bloques operativos 4 de los 6 presentan una confiabilidad inferior al 70,00% los cuales representan el 66,66% de los bloques operativos y en lo que respecta al sistema total su confiabilidad al cabo de un año es 25,99%.

De lo anterior se puede concluir que al cabo de un año, desde el punto de vista de los elementos, estos presentan una buena confiabilidad, ya que solo el 11,76% de ellos estarían por debajo del límite permitido; y si a estos elementos se les hace el mantenimiento adecuado, operarían todos sin ningún inconveniente.

Desde el punto de vista de los bloques, al cabo de un año presentan una confiabilidad baja ya que sólo el 33,33% se encuentra por encima del mínimo, todo esto se debe a que cada bloque está conformado por combinaciones serie-paralelo de elementos preponderando la configuración serie y el resultado de la manipulación algebraica de las confiabilidades según el diagrama de bloques da como resultado un valor menor que el del elemento serie con menor confiabilidad o el equivalente de los elementos en paralelo con menor confiabilidad.

Para la máquina en su conjunto, se tiene que al cabo de un año sin realizar ninguna labor de mantenimiento la confiabilidad es del 25,99%, el cual es un valor crítico y está ligado a la configuración de los bloques operativos que la conforman, el día para el cual la confiabilidad de la máquina llega al 70,00% es el día 100. Para mejorar la confiabilidad de la maquina al cabo de un año se debe establecer un cronograma de mantenimiento, mediante el cual se implementen rutinas enfocadas a fortalecer los elementos más críticos, para esto, apoyados en el análisis de confiabilidad se detectó que al cabo de un año los elementos críticos, Tabla 4, y las fechas para intervenir el bloque operativo, Tabla 5, servirán para establecer el cronograma de actividades de mantenimiento.

Elemento	Confiabilidad	Día mantenimiento
Sistema esmeril (Cortadora)	47,38%	175
Banda transporte lamina (PW30)	51,34%	195
Banda dentada lanzador (MW30)	54,881%	217
Sistema de vacío (Omega3)	64,74%	298

Tabla 4. Elementos críticos de acuerdo FTA y diagrama de bloques

Bloque operativo	Día de mantenimiento
Omega 3	151
PW 30	190
MW 30	238
Perforadora	353
PW 20	662
Cortadora	1350

Tabla 5. Día para intervención del bloque operativo

De acuerdo a la Tabla 5 se observa que para el día 151 es necesario realizar labores de mantenimiento en la Omega3, y teniendo en cuenta que un paro en este bloque operativo implica paro de todo el sistema (ver Figura 5) es recomendable realizar ajustes sobre la PW30 e intervenir el sistema de esmeril de la Cortadora, ya que éste para el día 175 llegará al 70% de su confiabilidad y tendrá que ser intervenido, si todo lo anterior es tenido en cuenta, cronológicamente los mantenimientos de los días 175 y 195 ya se habrán realizado y por consiguiente la próxima labor será la del día 238 pues aunque para el día 217 se llega al 70% de la confiabilidad en el elemento banda dentada lanzador del bloque MW30 la confiabilidad para el día 238 será del 67,62% dando una holgura de 21 días con respecto a su fecha de mantenimiento, lo anterior implica tener en stock el elemento por si en este lapso llegase a fallar; para el día 298 se tiene programada la labor sobre el sistema de vacío de la Omega 3, pero como cada 151 días se debe intervenir todo el bloque operativo la labor para este día será realizada el día 302; para el día 353 se tienen programadas labores de mantenimiento en la perforadora ya que esta alcanza el 70% de su confiabilidad y debido a que los bloques operativos PW20 y Cortadora requieren un mantenimiento general al cabo de 662 y 1350 días respectivamente, entonces para el día 353 se aprovechara para realizar ajustes a sus componentes. En la Tabla 6 se aprecia el cronograma de actividades de mantenimiento.

Día	Elemento	Bloque	Tipo
151	Todos	Omega 3	General
	Todos	PW30	General
	Sistema esmeril	Cortadora	Oportunidad
238	Todos	MW30	General
302	Todos	Omega 3	General
	Sistema esmeril	Cortadora	Oportunidad
353	Todos	Perforadora	General
	Todos	Cortadora	Oportunidad
	Todos	PW20	Oportunidad

Tabla 6. Cronograma para mantenimiento general y de oportunidad

Análisis de criticidad		Análisis de confiabilidad	
FMEA	RPN	Diagramas de Bloques	Confiabilidad
Gofrador (Perforadora)	166	Sistema esmeril (Cortadora)	47,38%
Freno motor principal (Cortadora)	152	Banda transporte lamina (PW30)	51,34%
Sistema plegadores (MW30)	119	Banda dentada lanzador (MW30)	54,88%
Sistema de moletas (Perforadora)	114	Sistema de vacío (Omega 3)	64,74%

Tabla 7. Comparativo FMEA y Diagrama de bloques

En la Tabla 7 se comparan los elementos más representativos del análisis de criticidad con los del análisis de confiabilidad, se aprecia que entre ellos no existen elementos iguales, reflejando esto que los elementos más críticos deben presentar una alta confiabilidad de modo que la probabilidad de falla sea pequeña, lo anterior no implica que las dos técnicas no se complementen ya que los elementos de mayor criticidad siempre deben ser tenidos en cuenta en los análisis de confiabilidad ya que una falla en uno de ellos implica un paro prolongado del sistema.

Desde el punto de vista de los datos estadísticos el sistema de vacío de la Omega 3 es el elemento más crítico a la hora de requerir una reparación, ya que su MTTR es 6,13 horas; y desde el punto de vista de la confiabilidad total del sistema también lo es ya que su confiabilidad decrece rápidamente y afecta potencialmente la confiabilidad del bloque operativo y por consiguiente la del sistema ya que en el modelo de confiabilidad esta en serie.

Una mejora en la confiabilidad de las empacadoras (MW30, PW20 y PW30) no representa un gran incremento en la confiabilidad total del sistema, es mas, garantizar en todas las empacadoras una confiabilidad del 100,00% durante todo un año implica una gran inversión de dinero para obtener tan solo un incremento en la confiabilidad del sistema del 1,02% quedando ésta en 27,01%.

El llevar los elementos más críticos que se detectaron mediante el FMEA a una confiabilidad hipotética del 100,00% durante un año, demostró que no son determinantes a la hora de mejorar la confiabilidad total, ya que el incremento fue de sólo 2,36% quedando en 28,35%. Lo cual es lógico ya que los elementos que aparecen en el RPN tienen confiabilidades altas alrededor del 96,00% (son elementos robustos de modo que nunca fallan) ya que una falla en ellos implicaría un paro total prolongado.

El elemento “sistema de vacío-Omega 3” es un elemento determinante a la hora de mejorar la confiabilidad total del sistema ya que al llevar su confiabilidad del estado

actual de 64,74% al hipotético caso del 100% para un año, la confiabilidad total aumentó el 14.16% quedando ésta en 40,15%, lo anterior evidencia la necesidad de mejorar la confiabilidad del elemento, ello se logra entre otras formas con: una mejor ubicación física de la bomba de forma que no esté expuesta a elementos corrosivos, brigadas periódicas de limpieza de forma que sus materiales rotativos no se vean afectados con partículas de polvo que desgasten la vida útil de la parte.

## 6. CONCLUSIONES

De los análisis de confiabilidad e inconfiabilidad, y teniendo en cuenta que ambos requieren de diferentes manipulaciones algebraicas, se pudo comprobar que son complementarios  $R(t) + Q(t) = 1$ , y, por lo tanto al realizar un análisis de confiabilidad inherentemente se está realizando el correspondiente análisis de inconfiabilidad y viceversa.

El FMEA es una metodología que permite identificar cuáles de todos los elementos que conforman un sistema son los más críticos, pero presenta la desventaja de producir camuflaje de elementos críticos si los encargados de implementar la metodología no poseen un amplio conocimiento en el instante de calificar los índices de detección y severidad.

El RPN es un indicador de riesgo y no de confiabilidad, por tal motivo el elemento más crítico según el RPN no necesariamente será el elemento con la confiabilidad más mala en todo el sistema, sino que hace referencia al elemento que en el momento de su falla causará el mayor traumatismo para la producción.

Al realizar un estudio de confiabilidad es necesario determinar el tipo de información que se tiene para el análisis, por tal razón es indispensable realizar una depuración a la información ya que en muchos casos en ésta se encuentran registrados datos que no contribuyen al análisis, por no seguir la tendencia del fenómeno o ser eventos extraordinarios que distorsionan el resultado.

Aunque los elementos críticos del FMEA no coincidan con los elementos para el análisis de confiabilidad e inconfiabilidad, esto no implica que los métodos de análisis sean incompatibles o no se complementen. Ya que el FMEA permite identificar los elementos que al fallar producen en el sistema el fallo más severo y el análisis de confiabilidad e inconfiabilidad permite determinar en qué momento se deben intervenir los elementos.

Los elementos que presentan mayor RPN deben ser considerados en el estudio de confiabilidad sin importar que estos no presenten un alto índice de ocurrencia, de los tres factores que determinan el RPN, el índice de ocurrencia, en realidad, no es el factor de peso ya que lo

que en realidad hace importante este elemento desde el punto de vista de confiabilidad del sistema son sus índices de detección y severidad, puesto que una falla en uno de los elementos que encabezan el RPN representa para la producción una parada prolongada.

La información de fallos que se registra en una base de datos se debe estandarizar de modo que no se presenten problemas con los datos consignados a la hora de ser manipulados en cualquier tipo de análisis. Para evitar esto la información debe ser consignada por el personal de mantenimiento evitando registrar como un fallo los ajustes sobre la marcha del proceso.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Crow K, "Failure Modes and Effects Analysis", Palos Verdes, CA: DRM Associates. 2002.
- [2] Unamuno M, "Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA)", Salamanca 2004 Universidad de Salamanca.
- [3] Nachlas J.A. "Fiabilidad". Isdefe. 1995, Primera edición.
- [4] Ericson A, Clifton LI, "Fault tree Analysis", System Safety Conference, Orlando, Florida, 1999.
- [5] Zapata C.J "Confiabilidad de sistemas eléctricos" Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Tecnología Eléctrica, Pereira 2005.
- [6] Montgomery D, Runger G "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley & Sons Inc. 2003.
- [7] P. L. Clemens, "Fault Tree Analysis", Cuarta Edición, Jacobs Sverdrup, 2002.
- [8] IEEE "*Power System Reliability Evaluation*", Tutorial course 82 EHO 195-8-PWR, IEEE, 1982.
- [9] T. Piqué, A. Lapeña. "Análisis Probabilístico de Riesgos: Metodología del Árbol de Fallos y Errores". Ed Limusa. 2001.