

ANÁLISIS DE INCONFIABILIDAD A UN PROCESO DE CONSTRUCCION DE ROLLOS DE PAPEL UTILIZANDO ARBOL DE FALLOS

Analysis of unreliability a process of construction paper rolls using fault tree

RESUMEN

Este documento es un complemento del anterior artículo titulado “análisis de confiabilidad aplicado a una conformadora de rollos empleando la técnica de modos de fallo”, en el cual se presentó un análisis de confiabilidad al proceso de construcción de rollos de papel. Ahora se muestra la ejecución de un análisis de confiabilidad utilizando la técnica de árbol de fallo, obteniendo resultados comparativos y similares con los de la técnica de modos de fallo.

PALABRAS CLAVES: Análisis de fallas, FTA, Inconfiabilidad.

ABSTRACT

This document is a complement of the previous paper titled “Reliability analysis applied to a roll forming machine using the failure modes technique”, in which appears a reliability analysis to the process of construction of paper rolls. Now is show the execution of a unreliability analysis using the technique of failure tree, obtaining the results comparative and similar with those of the technique of failure modes.

KEYWORDS: *Fault analysis, FTA, Unreliability.*

1. Introducción

El análisis de confiabilidad permite determinar los puntos frágiles de un sistema y a través de esto tomar las medidas necesarias para llevar a cabo el proceso de mejora y robustecimiento del sistema, de modo que los puntos frágiles detectados al ser ya conocidos no tomen por sorpresa a los operadores y se tenga el suficiente stock para reparar el sistema, corregir la falla o ajustar el proceso de modo que se minimice la indisponibilidad de los componentes.

Para poder llevar a cabo este análisis es necesario conocer el equipo (características y estado operativo), además de poseer una base de datos suficientemente completa para realizar el estudio del equipo. [1] [3] [5] [6]

2. Análisis de Fallas e Inconfiabilidad por FTA

2.1 Historia del FTA

El método de análisis del "Árbol de Fallos" (FTA: Fault Tree Analysis) fue concebido y utilizado por vez primera en la década del 60 por ingenieros de la Bell Telephone Laboratories, a petición de la fuerza aérea norteamericana, con el objetivo de evaluar la confiabilidad de los sistemas de misiles Minuteman. A partir de ese momento y a la fecha, esta técnica de análisis de riesgos, ha sido profundamente utilizada y

perfeccionada por diferentes entes de la industria, demostrando su alcance y versatilidad, pues abarca desde el sector investigativo hasta el campo industrial arrojando óptimos resultados y mejoras en el sistema [1].

2.2 Descripción del 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, en el cual en la parte superior se tiene el evento no deseado y a partir de él se ramifica en función de las posibles combinaciones de eventos que puedan dar lugar al suceso no deseado, 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.

Los eventos se rigen bajo jerarquías que se forman de la combinación de eventos predecesores que en presencia del operador lógico, son el resultado de la combinación de los eventos anteriores emulando las ramas de un árbol, también pueden resultar de la combinación de uno o varios eventos que no dependen de eventos anteriores y un suceso no desarrollado, sea por falta de información o por la poca utilidad que representa al proceso. [1, 3, 5]

SANTIAGO GÓMEZ ESTRADA

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

HUGO BALDOMIRO CANO

Ingeniero Electricista
Docente Transitorio
Universidad Tecnológica de Pereira
hbcano@utp.edu.co

FABIO ANTONIO OCAMPO

Ingeniero Electricista
Docente Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
faom@utp.edu.co

2.3 Simbología del FTA [6]

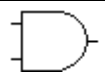

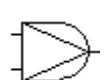

SIMBOLO	NOMBRE	SIGNIFICADO DEL SIMBOLO
	Puerta Y	El suceso de salida ocurre si, y solo si ocurren todos los eventos de entrada.
	Puerta O	El suceso de salida ocurre si ocurre alguno de los eventos de entrada.
	Puerta Y Prioritaria	El suceso de salida ocurre si, y sólo si todos los eventos de entrada ocurren en una secuencia determinada.
	Puerta O Exclusiva	El suceso de salida ocurre si ocurre una de las entradas, pero no dos o más de ellas.

Tabla 1 Símbolos de operadores lógicos para el árbol de fallas

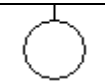
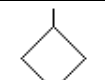
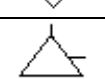
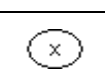
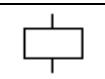
SIMBOLO	NOMBRE SIMBOLO	SIGNIFICADO DEL SIMBOLO
	Evento Básico	No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	Evento No Desarrollado	No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por poco interés.
	Transferencia	Indica que el árbol continúa en otro lugar.
	Condicionador de evento	Una condición específica (x) o restricción (x) que se aplica a una puerta.
	Evento Intermedio	Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas.

Tabla 2 Símbolos de eventos para el árbol de fallas

2.4 Fundamentación matemática

Propiedades del algebra de Boole para el análisis de árbol de fallas son [1]:

Propiedad conmutativa	$a + b = b + a$
	$a \cdot b = b \cdot a$
Propiedad asociativa	$a + (b + c) = (a + b) + c = a + b + c$
	$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c = a \cdot b \cdot c$
Propiedad distributiva	$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$
	$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$

Tabla 3. Axiomas del algebra de Boole

$a \cdot a = a$	$a + a = a$
$a \cdot (a + b) = a$	$a + a \cdot b = a$
$a + 0 = a$	$a \cdot 1 = a$
$a + 1 = 1$	$a \cdot a' = 0$
$a \cdot 0 = 0$	$a + a' = 1$

Tabla 4. Teoremas del algebra de Boole

Aprovechando las propiedades del algebra de Boole se puede reducir la función que describe el árbol de fallas.

2.5 Metodología del FTA

Para implementar el FTA es recomendable seguir una serie de pasos, siendo estos los siguientes [7]:

- a. Definir el sistema a estudiar.
En forma clara se deben definir: función (¿que hace?), características (constructivas, y operativas), estado (operativo o no operativo).
- b. Definir el evento no deseado para el análisis (paro total).
En esta etapa se define el evento (falla) que se desee estudiar, con el objetivo de determinar los posibles eventos que lo desencadenen.
- c. Definir el árbol y su alcance
Para esto, se determinan los eventos que están relacionados directamente con el evento no deseado, para determinarlos el paso es preguntarse “*que eventos hacen que se presente el fallo total*” y en función de esto, se construirá el árbol relacionando cada evento por medio de operadores lógicos (AND, OR, etc.), el alcance está limitado a la cantidad de información que se disponga del sistema (base de datos), experiencia del grupo de estudio y al grado de complejidad que se desee manejar.
- d. Resolver el árbol de falla
Para resolver el árbol de falla, se debe hacer un barrido desde el evento no deseado, hasta llegar a los eventos básicos o eventos no desarrollados que se encuentran en los niveles inferiores, para esto, apoyados en los operadores lógicos se obtiene la función que describe el árbol, la cual es simplificada por medio de los teoremas del algebra de Boole (tabla 3 y 4), obteniéndose así los eventos más críticos, en los cuales se debe centrar el estudio con el fin de corregirlos y así mejorar la confiabilidad del sistema.
- e. Análisis cuantitativo
Para el análisis cuantitativo del árbol (determinación de la probabilidad de falla o inconfiabilidad), se transformará el diagrama de árbol en un diagrama de bloques de la siguiente manera:
 - Los elementos que lleguen a una compuerta AND se transformarán en bloques en paralelo.
 - Los elementos que lleguen a una compuerta OR se transformarán en bloques en serie.
 Para el cálculo de la inconfiabilidad los bloques en paralelo se tratarán como se describe en la fórmula 1 y los bloques en serie se tratarán como se describe en la fórmula 2.

$$Q_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \text{Probabilidad de Falla} \quad (1)$$

$$Q_p(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) \quad (2)$$
- f. Acciones a tomar
Con respecto a las acciones a tomar, por lo general estas están enfocadas hacia los eventos más críticos detectados que conllevan al evento no deseado, con el

fin de recomendar acciones para corregirlos y así aminorar la confiabilidad del sistema.

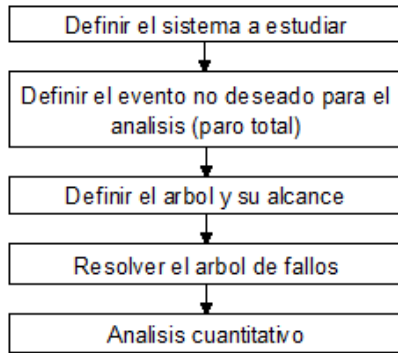


Figura 1. Algoritmo de cálculo de FTA

3. Análisis de Probabilidad de la Base de Datos

3.1 Índices de confiabilidad

Son utilizados para determinar el desempeño de un sistema, equipo o parte, entre los diferentes índices se tienen: MTBF, MTTF, MTTR [2].

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	$\frac{\sum_{i=1}^{N_f} ttf_i}{N_f} = r$	Contiene solamente las restauraciones de salidas no planeadas que involucran falla en el componente.

Tabla 5. Índices de confiabilidad (tiempos medios)

3.2 Modelos de confiabilidad para los componentes

Distribución	Ecuaciones	Gráfica	Tasa de eventos
Exponencial	$f(x) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}}$		Constante
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\rho\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\rho^2}}$		Para $\rho \geq 1$ es decreciente para $\rho < 1$ es creciente
Weibull	$f(x) = \alpha\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta}$		Para $\beta < 1$ es decreciente, para $\beta = 1$ es constante para $\beta > 1$ es creciente
Normal	$f(x) = \frac{1}{\rho\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\rho^2}}$		Creciente

Tabla 6. Modelos

Para realizar el análisis de los datos es necesario obtener el modelo que mejor describa el comportamiento de estos, por tal motivo se debe realizar un ajuste a los datos de tiempos para salida y tiempos para reparación del componente de modo que se puedan obtener las funciones de probabilidad (Normal, Lognormal, Exponencial, Weibull, etc.) que mejor lo representa. En la siguiente tabla se presentan algunos de los modelos de confiabilidad con sus ecuaciones, graficas y tasas de eventos [2, 4].

Para determinar la confiabilidad $Q(t)$ de cada parte se aprovecha la relación que existe entre la confiabilidad $R(t)$ y la confiabilidad de cada parte, es decir:

$$Q(t) = 1 - R(t) \tag{3}$$

4. Metodología Propuesta

4.1 Recolección de los datos para el análisis

Para el análisis de confiabilidad se utilizara la base de datos de mantenimiento del proceso, en la base de datos se debe tener el reporte de todas las acciones realizadas sobre los equipos del proceso.

4.2 Limpieza y reconocimiento de los datos

A la base de datos del proceso se le realizo un proceso de separación en función de los diferentes equipos que lo conforman, luego de esto se procedió a separar la información de los equipos en función sus partes constructivas y por último a cada parte constructiva se le realizo una proceso de limpieza, de modo que la información para el análisis solo fuera la referente a acciones de mantenimiento.

4.3 Manipulación y tratamiento de los datos

En esta etapa del análisis se determinaron los modelos de confiabilidad y a partir de estos se determinaron los modelos de confiabilidad de cada parte constructiva.

4.4 Obtención del árbol de fallas del sistema

Teniendo en cuenta las características del proceso y las definiciones del FTA se construye el diagrama que describe el árbol de fallas del proceso.

4.5 Análisis cuantitativo del árbol de fallas (cálculo de la confiabilidad)

Para realizar el análisis cuantitativo se tendrá en cuenta la metodología expuesta en el numeral 2.5.e, por medio de la cual se determinaran las confiabilidades para el proceso, equipos y parte.

5. Resultados

Después del proceso de limpieza a la base de datos inicial se trabajará con un total de 281 datos distribuidos de la siguiente manera:

Equipo	Numero de Datos
Omega	102
Cortadora	74
MW30	33
PW20	37
PW30	3
Perforadora	32

Tabla 7. Número de datos utilizados para el análisis

En la Figura 2 se muestra el árbol de fallas del proceso y es el que se utilizara para el cálculo de la inconfiabilidad.

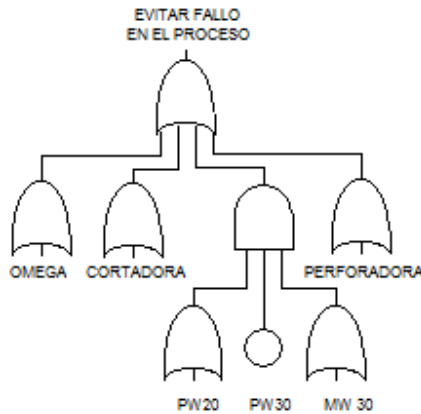


Figura 2. Árbol de fallas para el proceso

En función a los modelos de inconfiabilidad y del árbol de fallas se determinó la inconfiabilidad para cada parte constructiva, equipos y el proceso al cabo de un año.

En la Tabla 8 se aprecia que del total de partes, al cabo de un año presentan una inconfiabilidad mayor al 30,00% (sistema vacío-Omega, sistema esmeril-cortadora, banda transporte lamina-PW30 y banda dentada lanzador-MW30), lo cual es un indicador de que estas partes son las que más rápido se deterioran pero estos solo representan el 11,8% del total de las partes que conforman el proceso es decir, las partes que conforman el proceso presentan una baja inconfiabilidad. En lo que respecta a los equipos, al cabo de un año presentan una inconfiabilidad mayor al 30,00% los equipos (Omega, perforadora, PW30 y MW30), lo cual indica que estos equipos son los que más rápido se deterioran, esto se debe a que cada equipo está conformado por diferentes partes y su inconfiabilidad es debida a la asociación de las inconfiabilidades de dichas partes, es de notar que no necesariamente los equipos que presentan las más altas inconfiabilidades deben contener las partes que presentan las más altas inconfiabilidades.

Equipo	Parte	Inconfiabilidad	
		Parte (pu)	Equipo
Omega	Banda Alimentación Rollo	0,0595	57,71%
	Sistema de Pinzas	0,0465	
	Seguidor de Leva	0,1491	
	Sistema de Vacío	0,3526	
	Embutidores	0,0206	
	Sistema Corte de Lámina	0,0246	
	Sistema Succión	0,0658	
	Sellador Base	0,0268	
Cortadora	Expulsor de Rollo	0,0348	7,69%
	Sistema Cuchilla	0,0319	
	Freno Motor Principal	0,0435	
	Sistema Esmeril	0,5262	
	Motor Principal	0,0185	
	Torres	0,0169	
PW20	Banda Transporte Salida	0,0435	17,60%
	Sistema de Plegadores	0,0209	
	Alimentador de Rollos	0,075	
	Sellador Base	0,0654	
	Sistema de Corte	0,0228	
PW30	Banda Transporte Lámina	0,0617	48,66%
	Banda Transporte Lámina	0,4866	
MW30	Banda Transporte Lámina	0,2835	43,79%
	Sellador Base	0,0471	
	Sistema Plegadores	0,0324	
	Sistema Cuchilla Corte Lámina	0,0465	
	Banda Dentada Lanzador	0,4512	
	Banda Doble Dentada	0,2387	
Perforadora	Acumulador	0,0577	30,81%
	Banda del jinetillo	0,0723	
	Cuchilla descoladora	0,0531	
	Rodajas	0,0465	
	Sistema de moletas	0,0369	
	Gofrador	0,0454	
	Sistema de transferencia	0,0465	
Inconfiabilidad del proceso			74,00%

Tabla 8. Inconfiabilidad al cabo de un año de cada parte constructiva, equipos y proceso considerando todo nuevo.

Al cabo de un año de operación continua 4 de los 6 equipos violan el valor máximo de la inconfiabilidad es decir solo el 33,33% de los equipos al cabo de un año operan dentro de los límites. Pero si se observa el proceso como un todo este al cabo de un año presenta una inconfiabilidad del 76,00% lo cual lo no es permitido para ningún tipo de proceso, por lo tanto muestra que ya sea el proceso, los equipos o algunas partes constructivas deben ser intervenidas antes del año de modo que el proceso presente una inconfiabilidad menor al 30% garantizando un buen desempeño y calidad del producto final.

Con el objetivo de garantizar un correcto desempeño del proceso a lo largo de un año, se debe construir un cronograma de actividades de mantenimiento en el cual se indique la parte y/o equipo y la fecha de intervención

de modo que la confiabilidad nunca sea mayor al 30,00%. Para un año de operación es necesario intervenir las partes más críticas en el día especificado en la tabla 9 y los equipos tabla 10 de modo que sus confiabilidades no superen el 30,00%.

Parte	Inconfiabilidad a un año	Día
Sistema esmeril (Cortadora)	52,62%	175-350
Banda transporte lamina (PW30)	48,66%	195
Banda dentada lanzador (MW30)	45,12%	217
Sistema de vacio (Omega)	35,26%	298

Tabla 9 Día a intervenir la parte según el análisis.

Equipo	Día	Inconfiabilidad a un año
Omega	151-302	57,71%
PW30	190	48,66%
MW30	238	43,79%
Perforadora	353	30,81%
PW20	662	17,60%
Cortadora	1350	7,69%

Tabla 10 Día a intervenir el equipo según el análisis

Como se aprecia en la tabla 10 no es necesario intervenir los equipos PW20 y Cortadora en un año ya que presentan una confiabilidad muy baja y solo requerirían ser intervenidos en el día 662 y 1350 respectivamente.

En lo que respecta al proceso como un todo este debe ser intervenido en el día 100 ya que en ese momento este alcanza una confiabilidad del 30,00%.

Apoyados en los modelos de confiabilidad y en las tablas 9 y 10 se establece un cronograma de mantenimiento, de modo que en todas las partes constructivas y equipos que conforman el proceso se pueda garantizar una confiabilidad inferior al 30,00% durante todo un año. En la tabla 11 se puede apreciar el cronograma de actividades que indica la parte constructiva a intervenir, el equipo al que corresponde y el tipo de mantenimiento a realizar.

Día	Parte a intervenir	Equipo	Tipo de mantenimiento
151	Todas las partes	Omega	Total
	Todas las partes	PW30	Total
	Sistema esmeril	Cortadora	Ocasión
238	Todas las partes	MW30	Total
302	Todas las partes	Omega	Total
	Sistema esmeril	Cortadora	Ocasión
353	Todas las partes	Perforadora	Total
	Todas las partes	Cortadora	Ocasión
	Todas las partes	PW20	Ocasión

Tabla 11 Cronograma para mantenimiento total y de ocasión.

De la tabla 12 se puede decir que de todo el proceso el equipo Omega es el que presenta mayor problema por tiempo de reparación, ya que de sus 9 partes 6 requieren más de 4 horas para ser reparadas, siendo la más crítica el

sistema vacío pues su tiempo para falla es el más corto de todas las partes que conforman el proceso.

Equipo	Parte	MTTR [horas]	MTBF [días]	MTTF [años]
Omega	Banda Alimentación Rollo	4,0179	6,3872	0,4337
	Sistema de Pinzas	2,9273	17,3758	0,5368
	Seguidor de Leva	4,2613	9,3351	0,2827
	Sistema de Vacío	6,1333	12,7917	0,1022
	Embutidores	3,2146	89,6649	0,4784
	Sistema Corte de Lámina	6,0958	23,9818	0,2828
	Sistema Succión	5,1697	16,3338	0,3084
	Sellador Base	5,8405	22,0538	0,3239
	Expulsor de Rollo	2,8861	30,8779	0,5090
Cortadora	Sistema Cuchilla	1,2750	29,9707	0,5559
	Freno Motor Principal	1,0381	63,0546	0,9896
	Sistema Esmeril	0,7405	8,5613	0,6787
	Motor Principal	3,3111	47,1389	0,1919
	Torres	1,5028	58,772	0,4285
	Banda Transporte Salida	0,8733	25,9343	0,1634
PW20	Sistema de Plegadores	1,8537	28,7921	0,2904
	Alimentador de Rollos	4,9782	11,2965	0,3081
	Sellador Base	2,4409	22,7588	0,5281
	Sistema de Corte	2,4931	24,8611	0,3776
PW30	Banda Transporte Lámina	3,6067	7,3925	0,3893
MW30	Banda Transporte Lámina	2,1533	24,0882	0,3201
	Banda Transporte de Lámina	3,9702	6,6310	0,1978
	Sellador Base	1,6771	24,8442	0,3110
	Sistema Plegadores	3,6433	34,0438	0,2699
	Sistema Cuchilla Corte Lámina	3,7361	32,7633	0,3806
	Banda Dentada Lanzador	5,8167	49,1450	0,5287
Perforadora	Banda Doble Dentada	3,9857	11,3884	0,1893
	Acumulador	1,1690	57,5843	0,9368
	Banda del jinetillo	0,5517	42,1344	0,9702
	Cuchilla descoladora	2,3687	47,3299	0,7778
	Rodajas	0,4000	97,0703	0,9300
	Sistema de moletas	2,3687	47,3299	0,7778
	Gofrador	3,0367	86,7299	1,0225
Sistema de transferencia	0,6292	98,0955	0,9296	

Tabla 12. Índices de confiabilidad (tiempos medios)

En la figura 2 se aprecia que los equipos PW20, PW30 y MW30 al llegar a una compuerta AND hacen que la confiabilidad equivalente sea menor que la menor de las confiabilidades individuales, y por esta razón las intervenciones de mantenimiento sobre ellos no presentaran una mejora relativa sobre la confiabilidad total del proceso. Considerando el caso en el que se realice una intervención total sobre los equipos PW20, PW30 y MW30 la confiabilidad del sistema solo se reducirá unos cuantos puntos, ya que los otros equipos presentan confiabilidades mucho mayores como se aprecia en la tabla 8

6. Conclusiones

El FTA permite determinar la confiabilidad de los equipos y del proceso, además facilita comprender mejor el sistema ya que se requiere un completo estudio de las partes o equipos además de que ayuda a identificar los eslabones más débiles del proceso.

Para aplicar el FTA en el caso de no tener los modelos que describan la confiabilidad de cada parte constructiva, es necesario asignar valores a cada una de las probabilidades en forma empírica y por esto es necesario que dicha labor sea realizada por expertos.

Para realizar un análisis de confiabilidad es necesario contar con una base de datos completa y depurada, ya que si no posee estas características los modelos no representarían correctamente el comportamiento de cada una de las partes constructivas y por tal motivo los resultados de los análisis estarán distorsionados.

El FTA mostro que el eslabón más débil de todo el proceso es el sistema vacío que se encuentra en el equipo Omega, por tal motivo si este elemento es reforzado o constantemente es intervenido la confiabilidad del proceso será reducida en gran proporción.

Los resultados obtenidos en este análisis se asemejan en gran proporción a los obtenidos en el análisis de modos de fallos lo cual muestra que ambas técnicas permiten determinar la confiabilidad o la confiabilidad del proceso.

7. Referencias

- [1] Ericson A, Clifton LI, "Fault tree Analysis", System Safety Conference, Orlando, Florida, 1999.
- [2] Zapata C.J "Confiabilidad de sistemas eléctricos" Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Tecnología Eléctrica, Pereira 2005.
- [3] P. L. Clemens, "Fault Tree Analysis", Cuarta Edición, Jacobs Sverdrup, 2002.
- [4] IEEE "*Power System Reliability Evaluation*", Tutorial course 82 EHO 195-8-PWR, IEEE, 1982.
- [5] T. Piqué, A. Lapeña. "Análisis Probabilístico de Riesgos: Metodología del Árbol de Fallos y Errores". Ed Limusa. 2001.
- [6] T. Piqué, "NTP 333 "Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del árbol de fallos y errores" INSHT, Barcelona 1994.
- [7] Martínez A Rosalva, Rodríguez S José. "Análisis de Árbol de Fallas del Sistema de una Llave para Agua", Revista Ingeniería Industrial – ITC, México Enero - Junio 2007, Año 2 No. 2