



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CONFIABILIDAD EN SISTEMAS INDUSTRIALES

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

P R E S E N T A:

ING. LAURO JAIME RAMOS SOTO

TUTOR:

M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO

2007



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ricardo Aceves García

Secretario: M.I. Silvina Hernández García

Vocal: M.I. Francisca Irene Soler Anguiano

1er Suplente: Dra. Idalia Flores De La Mota

2do. Suplente: M. en I. Ann Wellens Purnal

Lugar donde se realizó la tesis:  
México, D.F.

TUTOR DE TESIS:  
M.I. Francisca Irene Soler Anguiano

---

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A la maestra Francis, por su apoyo en la dirección de esta tesis.

A mis sinodales, por su tiempo, paciencia y aportaciones a este trabajo.

A mis padres: Lauro y Olga, por todo su amor y comprensión.

A Marisol, mi querida hermana, por tu cariño y compañía.

A mis compañeros y amigos de estudio.

A todas y cada una de las personas que me han impulsado a través de mi vida.

Gracias a CONACYT, por su apoyo económico.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	1
<b>ABSTRACT</b>	2
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	4
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	4
<b>ALCANCES Y LIMITACIONES</b>	4
<b>1. DEFINICIONES Y CONCEPTOS</b>	<b>5</b>
1.1 Definición de confiabilidad	5
1.2 Tipos de sistemas	5
1.3 Estudio cualitativo y cuantitativo del sistema	7
1.4 Definiciones	9
1.5 Sistemas reparables y no reparables	12
1.6 Función estructural de un sistema	14
1.6.1 <i>Sistemas en serie</i>	14
1.6.2 <i>Sistemas en paralelo</i>	15
1.6.3 <i>Sistemas tipo “k” de “n” salidas</i>	16
1.7 Confiabilidad de un sistema	16
1.7.1 <i>Confiabilidad de sistemas en serie</i>	17
1.7.2 <i>Confiabilidad de sistemas en paralelo</i>	17
1.7.3 <i>Confiabilidad en sistemas tipo “k” de “n” salidas</i>	17
1.8 Parámetros probabilísticos para los componentes de un sistema	18
1.9 Sistemas industriales	21
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>22</b>
2.1 Técnicas de análisis	22
2.1.1 <i>Evaluación de confiabilidad</i>	22
2.1.2 <i>Análisis de riesgo</i>	22
2.1.3 <i>Herramientas de uso específico</i>	22
2.2 Metodología propuesta	23
2.3 Entender el funcionamiento del sistema	23
2.4 Consulta con expertos	24
2.5 Árbol de fallo	25
2.5.1 <i>Construcción del árbol de fallo</i>	25
2.5.2 <i>Elementos del árbol de fallo</i>	26
2.6 Recolección de datos	32
2.7 Cálculo de disponibilidad	34
2.7.1 <i>Eventos básicos independientes</i>	35
2.7.2 <i>Sistema con compuerta tipo AND</i>	35

2.7.3 Sistema con compuerta tipo OR	36
2.7.4 Sistema con compuerta tipo “m” de “n”	37
2.8 Cálculo de confiabilidad	38
2.8.1 La técnica KITT	38
2.8.2 Conjuntos de corte	41
2.8.3 Generación de conjuntos mínimos de corte	41
2.8.4 Parámetros de conjuntos mínimos de corte	42
2.9 Simulación Montecarlo	43
2.10 Resultados	43
<b>3. CASO DE ESTUDIO</b>	<b>45</b>
3.1 Descripción	45
3.2 Uso de la metodología	49
3.3 Funcionamiento del sistema	49
3.4 Descripción del proceso	50
3.5 Consulta a expertos	52
3.5.1 Descripción de sistemas	52
3.6 Construcción del árbol de fallo	55
3.7 Recolección de datos	56
3.8 Cálculo de disponibilidad del sistema	57
3.9 Cálculo de confiabilidad del sistema	59
<b>4. Simulación Montecarlo</b>	<b>62</b>
4.1 El método Montecarlo	62
4.2 La simulación Montecarlo	63
4.3 Simulación Montecarlo en una hoja de cálculo	66
4.4 Validación de resultados	73
4.5 Análisis y reporte de resultados	76
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>82</b>
<b>Apéndice I</b>	<b>85</b>
<b>Apéndice II</b>	<b>93</b>
<b>Apéndice III</b>	<b>104</b>
<b>Apéndice IV</b>	<b>107</b>
<b>Apéndice V</b>	<b>119</b>
<b>Apéndice VI</b>	<b>123</b>
<b>Apéndice VII</b>	<b>135</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema de misión orientada	6
Figura 1.2	Sistema de misión orientada con tiempo de espera	7
Figura 1.3	Sistema en operación continua	7
Figura 1.4	Sistema en serie	15
Figura 1.5	Sistema en paralelo	15
Figura 1.6	Curvas de disponibilidad	19
Figura 2.1	Evento básico	26
Figura 2.2	Evento indeterminado	27
Figura 2.3	Evento condicional	27
Figura 2.4	Evento House	27
Figura 2.5	Compuerta AND	28
Figura 2.6	Compuerta OR	28
Figura 2.7	Compuerta tipo “m” de “n”	29
Figura 2.8	Compuerta de inhibición	30
Figura 2.9	Compuerta de transferencia	31
Figura 2.10	Compuerta tipo rectángulo	31
Figura 2.11	Estructura de un árbol de fallo	32
Figura 2.12	Árbol de fallo para un sistema	35
Figura 2.13	Árbol de fallo con compuerta tipo AND	36
Figura 2.14	Árbol de fallo con compuerta tipo OR	37
Figura 2.15	Árbol de fallo con compuerta “m” de “n”	37
Figura 2.16	Componente en fallo durante el intervalo $[t, t+dt)$	40
Figura 3.1	Descripción del proceso de polimerización	51
Figura 3.2	Árbol de fallo para el evento tope “Producto fuera de especificación”	55
Figura 3.3	Árbol de fallo para el evento tope “Paro de planta”	56
Figura 3.4	Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento Evento tope “Producto f/e”	57
Figura 4.1	Ejemplo de método Montecarlo	62
Figura 4.2	Árbol de fallo para el sistema de precalentador con evento tope “Paro de planta”	68
Figura 4.3	Variación del valor de confiabilidad con respecto al número de simulaciones	71
Figura 4.4	Valores de intervalos de confianza con respecto Al número de simulaciones	72
Figura 4.5	Variación de confiabilidad respecto al tiempo Con evento tope “producto f/e”	77
Figura 4.6	Variación de confiabilidad respecto al tiempo Con evento tope “Paro de planta”	78
Figura AI.1	Sistema de enfriamiento	85
Figura AI.2	Sistema de alimentación	87

Figura AI.3 Sistema de precalentador	89
Figura AI.4 Sistema de iniciador	90
Figura AI.5 Sistema de control de peso	91
Figura AI.6 Sistema de agitación	92
Figura AII.1 Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento caso “producto f/e”	94
Figura AII.2 Árbol de fallo para el sistema de alimentación caso “producto f/e”	95
Figura AII.3 Árbol de fallo para el sistema de iniciador caso “producto f/e”	95
Figura AII.4 Árbol de fallo para el sistema de control de peso caso “producto f/e”	96
Figura AII.5 Árbol de fallo para el sistema de agitación caso “producto f/e”	97
Figura AII.6 Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento caso “paro de planta”	98
Figura AII.7 Árbol de fallo para el sistema de alimentación caso “paro de planta”	99
Figura AII.8 Árbol de fallo para el sistema de precalentador caso “paro de planta”	100
Figura AII.9 Árbol de fallo para el sistema de iniciador caso “paro de planta”	101
Figura AII.10 Árbol de fallo para el sistema de peso caso “paro de planta”	102
Figura AII.11 Árbol de fallo para el sistema de agitación caso “paro de planta”	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tabla de verdad para la compuerta AND	28
Tabla 2.2 Tabla de verdad para la compuerta OR	29
Tabla 2.3 Tabla de verdad para compuerta tipo “m” de “n”	29
Tabla 2.4 Tabla de verdad para la compuerta de inhibición	30
Tabla 3.1 Tasas de fallo para el árbol de fallo del sistema de enfriamiento, evento tope “producto f/e”	58
Tabla 3.2 Valores de disponibilidad y no disponibilidad	59
Tabla 3.3 Valores de confiabilidad para los sistemas en estudio, evento tope “Paro de planta”	60
Tabla 3.4 Valores de confiabilidad para el sistema con evento tope “Paro de planta”	60
Tabla 3.5 Valores de confiabilidad para los sistemas en estudio, evento tope “Producto f/e”	61
Tabla 3.6 Valores de confiabilidad para el sistema con evento tope “producto f/e”	61
Tabla 4.1 Tiempos de fallo para varias distribuciones	66
Tabla 4.2 Ejemplo de simulación Montecarlo	67

con hoja de cálculo para compuerta AND	68
Tabla 4.3 Simulación Montecarlo con hoja de cálculo	68
Tabla 4.4 Simulación Montecarlo con hoja de cálculo	68
Tabla 4.5 Simulación Montecarlo con hoja de cálculo	69
Tabla 4.6 Simulación Montecarlo con hoja de cálculo	69
Tabla 4.7 Simulación Montecarlo con hoja de cálculo	69
Para la componente 45	
Tabla 4.8 Simulación Montecarlo con hoja de cálculo	70
Tabla 4.9 Simulación Montecarlo para sistema	70
Tabla 4.10 Resultados de simulación Montecarlo para el sistema, con evento tope “Producto f/e”	72
Tabla 4.11 Resultados de simulación Montecarlo para el Sistema, con evento tope “Paro de Planta”	72
Tabla 4.13 Comparativo entre valores de confiabilidad usando diferentes técnicas	74
Tabla 4.12 Comparativo entre valores de confiabilidad usando diferentes técnicas	76
Tabla AI.1 Elementos del sistema de enfriamiento	86
Tabla AI.2 Elementos del sistema de alimentación	88
Tabla AI.3 Elementos del sistema de precalentador	88
Tabla AI.4 Elementos del sistema de iniciador	91
Tabla AI.5 Elementos del sistema de control de peso	91
Tabla AI.6 Elementos del sistema de agitación	92

## RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo el presentar una metodología de evaluación de confiabilidad para sistemas industriales enfocada a evitar la ocurrencia de eventos indeseables que afecten la calidad del producto terminado o la continuidad de operaciones.

La metodología propuesta evalúa en forma cualitativa y cuantitativa la confiabilidad de un sistema industrial con técnicas usadas en el análisis de riesgo e investigación de operaciones y adaptadas para el estudio en cuestión, para cada punto que constituye a la metodología se brinda un análisis y justificación de su inclusión; por otro lado, se brinda las definiciones y conceptos así como los fundamentos matemáticos que soportan un estudio de confiabilidad.

Finalmente, se aplicó la metodología a la evaluación de confiabilidad para una planta petroquímica, con finalidad de evitar dos eventos indeseables: producto fuera de especificación y pérdida de operaciones.

## **ABSTRACT**

The objective of this work was to develop a reliability methodology for industrial systems, focused on avoiding undesirable events that affect the quality of the finished product or operation continuity.

The methodology suggested, evaluates in a qualitative and quantitative way the reliability of an industrial systems using techniques that have been widely proved in risk analysis and operations researches; for each point that constitutes the methodology, a discussion and analysis is developed; also, definitions, concepts and mathematical concepts that support a reliability assessment are included.

Finally, the methodology was applied for a petrochemical plant reliability assessment; tend to avoid the occurrence of two undesirable events: quality out of specifications and lost of operations.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios de confiabilidad tienen su origen en la necesidad de reducir la incertidumbre de fallo en un sistema. Pocas cosas molestan tanto a un consumidor como el fallo pronto y repentino de un artículo de consumo; a nivel industrial, un fallo de sistema provoca, en el mejor de los casos, pérdida de imagen y competitividad, pero también ha provocado accidentes de grandes y graves dimensiones.

El justificado temor que provoca la energía nuclear y la industrial química ha provocado presiones jurídicas que se trasladaron al desarrollo de técnicas que permiten el predecir el fallo en un sistema que lleve a eventos indeseables catastróficos.

En la actualidad, los productos y sistemas son cada vez más complejos, así mismo un mercado cada vez más competitivo exige productos y sistemas con menor índice de fallo; en otras palabras, se desea que los sistemas y productos sean altamente confiables.

En la actualidad los estudios de confiabilidad se realizan con la finalidad de cumplir con la legislación en materia de riesgo potencial que un sistema industrial puede causar; por tanto un estudio de confiabilidad es considerado un gasto superfluo, confuso y de el de no brindar otro beneficio que el cumplir con un requisito legal.

Este trabajo aborda el tema de confiabilidad desde el punto de vista de calidad y competitividad; para ello se propone una metodología de evaluación de confiabilidad enfocada a medir los efectos del fallo de las componentes de un sistema en la calidad del producto terminado o en la continuidad de operaciones.

La metodología presenta una evaluación cualitativa y cuantitativa de la confiabilidad; la metodología propuesta se compone de ocho puntos, para cada uno de estos puntos se presentan las razones y justificación de su inclusión; a manera de validación, la metodología se confronta con un caso real de estudio.

La evaluación cuantitativa se realiza por tres técnicas diferentes, en la que cabe mención aparte la simulación Montecarlo; esta técnica que ha sido ampliamente usada en la investigación de operaciones ha sido adaptada para su uso en confiabilidad.

Finalmente, este trabajo pretende realizar un vínculo entre teoría y práctica.

## **OBJETIVO GENERAL**

Proponer una metodología que permita la evaluación cualitativa y cuantitativa de confiabilidad en sistemas industriales.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Presentar definiciones y conceptos del estudio de confiabilidad.
2. Indicar los fundamentos matemáticos teóricos que soportan los estudios de confiabilidad.
3. Proponer una metodología cuya finalidad sea el realizar un estudio de confiabilidad industrial.
3. Justificar cada uno de los puntos que conforman la metodología.
4. Confrontar la metodología con un caso real de estudio.
5. Realizar un vínculo entre teoría y práctica.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

Para llevar a cabo este trabajo, se realizó una exhaustiva revisión de la teoría que envuelve a un estudio de confiabilidad y se elaboró un resumen de definiciones y conceptos; pese a que algunos de los conceptos definidos no participan directamente en la metodología propuesta se incluyeron, por considerarse importante y enriquecedor para la comprensión del tema en estudio.

La metodología se compone de ocho pasos, resultado del estudio de técnicas y recomendaciones obtenidas de fuentes consultadas y experiencia personal del autor; en todo momento se tuvo presente que el objetivo de la metodología es el análisis de sistemas industriales, de allí la inclusión o discriminación de ciertas técnicas presentes en el análisis de riesgo y la investigación de operaciones.

Un caso real fue analizado usando la metodología desarrollada, el sistema en estudio refleja uno de los más complejos y sensibles a posibles fallos eventuales; por razones de confidencialidad, no se menciona la razón social de la empresa y se modificaron los diagramas de ingeniería presentados en el trabajo.

Una metodología que abarque todos los sistemas industriales puede parecer extremadamente ambiciosa, pese a que se consideró y analizó a una gran cantidad de sistemas industriales, la metodología presentada puede y debe ser mejorada.

# 1. DEFINICIONES Y CONCEPTOS

## 1.1 Definición de confiabilidad

Un producto o proceso es considerado confiable si este funciona correctamente cuando se espera que lo haga. La norma Británica BS 4778 (1991) la define como “la característica de un ítem (un elemento de un equipo, un equipo completo o de un sistema), expresada por la probabilidad de que efectúe una función adecuada, bajo ciertas condiciones (condiciones nominales de operación), en un período de tiempo establecido”. La confiabilidad se identifica con la letra mayúscula R y dado que expresa un valor probabilístico, la confiabilidad toma valores entre 0 y 1.

Esta definición, incluye cuatro condiciones:

- Probabilidad.
- Funcionamiento adecuado.
- Condiciones de operación.
- Tiempo.

El estudio probabilístico, brinda el valor numérico para la medición de confiabilidad así como del comportamiento del sistema; si bien el valor de la confiabilidad es el parámetro más significativo existen otros de gran importancia que serán definidos y calculados.

Las técnicas de evaluación para la confiabilidad son usadas y han sido desarrolladas por varias ramas de la ingeniería; de hecho la confiabilidad es interdisciplinaria y un método en particular puede ser usado en un amplio número de sistemas que incluyen ramas de la ingeniería tan diversas tales como la eléctrica, mecánica, civil, química, etc.

Debe señalarse que lo anterior no significa que un determinado método de cálculo debe ser usado para resolver todo tipo de problemas. Sería un error estandarizar una técnica en particular sin realizar un análisis de la problemática a resolver.

## 1.2 Tipos de sistemas

Existen dos tipos de sistemas: los de misión orientada y los sistemas de operación continua.

Los sistemas de misión orientada, son aquellos que deben funcionar de forma ininterrumpida, durante el tiempo que dura la misión. Fallas eventuales en las componentes del sistema son permitidas siempre y cuando el funcionamiento del mismo en su conjunto no se vea

interrumpido. Al entrar en fallo las componentes que forman al sistema pueden permanecer en este estado, lo que origina un sistema no reparable; por otro lado si las componentes pueden ser reparadas o reemplazadas, el sistema es del tipo reparable. En este último caso, las componentes deben ser reemplazadas o reparadas sin interrumpir la misión.

El sistema de misión orientada, es subdividido, a su vez en dos categorías:

- a. El primero es aquél en el que la fase de operación comienza cuando el sistema es revisado y se determina que se encuentra en estado de operar. La misión debe completarse sin fallo por el sistema y la probabilidad de fallo debe ser inferior al de un nivel considerado como aceptable. La misión es exitosa si el tiempo en la que se lleva a cabo ( $T_M$ ) es inferior a un determinado tiempo de fallo ( $T_F$ ) (Figura 1.1).
- b. El segundo caso incluye a aquellos sistemas en los que hay una etapa de espera posterior al punto en que se verifica que el sistema opera correctamente. Durante el tiempo de espera ( $T_I$ ), el sistema puede fallar y dependiendo de la respuesta del sistema, puede fallar en cumplir su misión ( $T_M$ ). Este es el caso de las componentes redundantes, que se encuentran en espera para entrar en acción, cuando la componente principal entra en fallo (Figura 1.2).

Los sistemas en operación continua, son aquellos en los cuales la operación puede fallar, siempre y cuando esto no ocurra muy frecuentemente o dure demasiado tiempo. Se busca preferentemente que el sistema no falle nunca, debido a un adecuado mantenimiento preventivo (Figura 1.3).

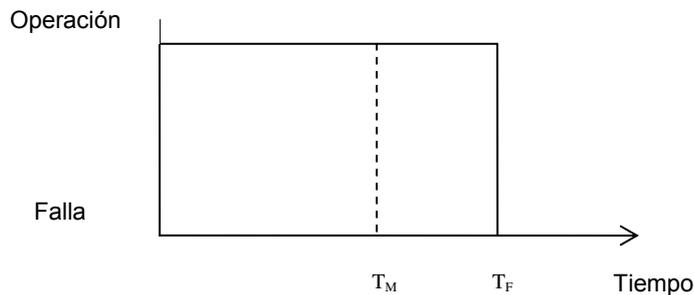


Fig. 1.1 Sistema de misión orientada  
Fuente: "Reliability Evaluation of Engineering Systems"  
Billinton, Alan Página 4.

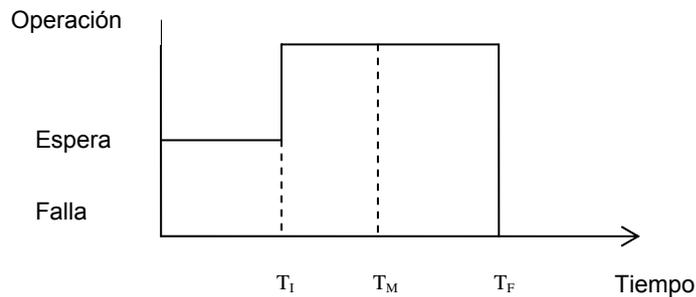


Fig. 1.2 Sistema de misión orientada con tiempo de espera  
 Fuente: "Reliability Evaluation of Engineering Systems"  
 Billinton, Alan Página 4.

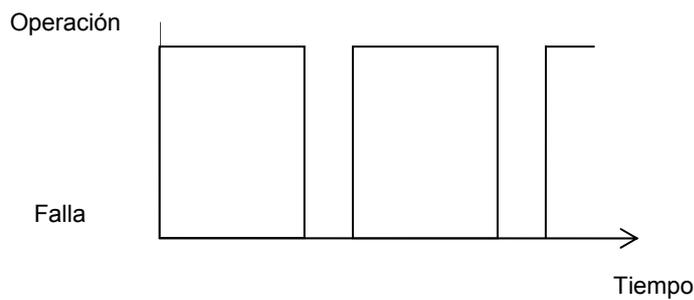


Fig. 1.3 Sistema en operación continua  
 Fuente: "Reliability Evaluation of Engineering Systems"  
 Billinton, Alan Página 4.

### 1.3 Estudio cualitativo y cuantitativo del sistema

El hacer un sistema confiable no es un tema nuevo; siempre se ha deseado diseñar, fabricar y operar sistemas que se encuentren libres de fallas. Este propósito ha sido alcanzado sólo parcialmente ya que se basa generalmente en la experiencia subjetiva de diseñadores y operadores.

Esta forma de evaluar la confiabilidad ha sido puesta en duda en varias ocasiones, el principal cuestionamiento es la ausencia de sistematización que permita realizar una comparación de alternativas de configuración alternos.

La confiabilidad es una característica inherente de un sistema o producto, es tanto un parámetro como una medida de análisis que debe ser integrada desde el diseño del sistema; para alcanzar este objetivo, el estudio de confiabilidad del sistema debe expresarse en forma tanto cualitativa como cuantitativa, en una forma sistematizada.

La evaluación cualitativa de confiabilidad del sistema puede ser usada para indicar como un sistema puede fallar, sugerir las consecuencias del fallo e identificar partes débiles del sistema; por otra parte un estudio cuantitativo de confiabilidad del sistema tiene como propósitos principales el analizar el comportamiento pasado del sistema y servir como medida de predicción de un comportamiento futuro.

El análisis del comportamiento pasado del sistema brinda ventajas tales como:

- Identificar áreas débiles del sistema, que necesiten reforzarse o modificarse.
- Establecer un comportamiento cronológico de confiabilidad.
- Conocer los índices de comportamiento del sistema.
- Como bitácora para comparar las predicciones del sistema con el comportamiento pasado y actual del mismo.
- Monitorear las respuestas del sistema a alguna eventual modificación física del mismo.

La medida de predicción aporta:

- El analizar como se comportará un sistema en el futuro.
- Los beneficios de modificar el sistema.
- Los efectos que se tendrían al modificar la filosofía operacional de mantenimiento o diseño.
- El costo/beneficio asociado a los incisos anteriores.

Un sistema no sigue un comportamiento determinístico, opera de manera aleatoria al paso del tiempo. Independientemente de que este comportamiento varíe significativamente en cuestión de unos cuantos segundos ó hasta en décadas el sistema se comporta de manera estocástica, de allí que el análisis se realice usando probabilidad.

Es importante el señalar que un estudio de confiabilidad esta sujeto a la incertidumbre que rodea a todo estudio probabilístico, por lo que un análisis completo comprende además el entender como opera el sistema, su diseño, los tipos de falla y el cómo ocurren, así como las presiones ambientales y legales a los que está sometido. En este aspecto, la probabilidad no debe ni puede sustituir al buen juicio y experiencia de un criterio de ingeniería con gran experiencia. La probabilidad es una herramienta que transforma el conocimiento que

se tiene del sistema en una medida cuantificable de predicción de un futuro comportamiento.

#### 1.4 Definiciones

Los conceptos y parámetros probabilísticos más importantes son:

**Experimento:** es un proceso cuyo resultado no se conoce con certeza. El conjunto de posibles resultados de un experimento se denomina el espacio de muestreo S.

**Variable aleatoria:** X es una variable aleatoria si puede tener asignado cualquier valor (no previsible) de un rango finito (variable aleatoria discreta) o infinito (variable aleatoria continua) de posibles valores. Formalmente, una variable aleatoria es una función que asigna un número a cada posible resultado del experimento (espacio de muestreo).

**Función de densidad de probabilidad f(x):** indica la probabilidad de que una variable aleatoria asuma un cierto valor de  $x_i$ :

$$f(x_i) = P(X \leq x_i) \tag{1.1}$$

Para una variable aleatoria continua, el lugar de describir la probabilidad de que una variable aleatoria asuma un valor determinado, se describe la probabilidad de que la variable aleatoria asuma un valor dentro de un rango de valores (entre a y b):

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \tag{1.2}$$

**Función de distribución acumulada:** describe la probabilidad de que una variable aleatoria X asuma un valor más pequeño o igual que un cierto valor  $x_i$ :

$$F(X_i) = P(X \leq x_i) \tag{1.3}$$

Para las variables aleatorias continuas, la función de distribución acumulativa teórica se determina integrando la función de densidad teórica:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx \quad (1.4)$$

Además:

$$F(\infty) = 1 \quad (1.5)$$

Las distribuciones más utilizadas en confiabilidad son: la distribución exponencial y la distribución de Weibull.

**Distribución exponencial:** La Función de distribución y densidad de esta distribución se definen como:

Función densidad de probabilidad:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0 \quad (1.6)$$

Donde t es tiempo y  $\lambda$  es el parámetro de la distribución.

Función de distribución:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

**Distribución Weibull:** La Función de distribución y densidad de la distribución Weibull están definidas como:

Función de densidad de probabilidad:

$$f(x) = \left( \frac{\theta t^{\theta-1}}{\beta^\theta} \right)^{(\theta-1)} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\theta\alpha}} \quad t \geq 0, \theta > 0, \beta > 0 \quad (1.8)$$

Donde  $\theta$  y  $\beta$  son los parámetros de forma y escala, respectivamente.

Función de distribución:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\theta}$$

(1.8)

La distribución exponencial juega el papel más importante en la confiabilidad de sistemas. La distribución de fallo es exponencial para una gran variedad de sistemas, entre otros sistemas electrónicos, eléctricos, digitales y mecánicos. Además, el teorema de Drenick demuestra que aunque un sistema o componente posea una distribución de fallo diferente a la exponencial, con el tiempo seguirá una distribución exponencial.

Adicionalmente una serie de transformaciones sencillas logran que la distribución Weibull pueda ser expresada como una distribución exponencial; finalmente y de acuerdo al método de Stages, cualquier distribución puede ser expresada como una combinación de distribuciones exponenciales.

**Disponibilidad A(t):** indica la probabilidad de que un sistema se encuentre operando a un tiempo determinado. Toma un valor entre 0 y 1.

**Tiempo esperado entre fallas (MTBF):** Define el tiempo esperado entre dos fallas sucesivas del sistema, por lo general el tiempo se mide en horas. Este parámetro se emplea en sistemas que pueden ser reparados.

**Tiempo esperado de falla (MTTF):** Determina el tiempo medio de ocurrencia de fallo para un sistema que es no reparable. Los sistemas no reparables sólo pueden fallar una vez, por lo que MTTF es equivalente a la media de la distribución de fallo. Este parámetro generalmente se expresa en número de horas al primer fallo.

**Tasa de fallo ( $\lambda$ ):** Define el número de fallos esperados en un período de tiempo determinado.

Matemáticamente la tasa de fallo se identifica:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

(1.9)

Donde:

$\lambda(t)$ = tasa de fallo al tiempo t.

$f(t)$ = función de densidad de fallo (función de densidad de probabilidad).

$R(t)$ = Confiabilidad al tiempo t.

Si la distribución exponencial se usa para modelar el tiempo de fallo, se tiene:

$$\lambda(t)=\lambda \tag{1.10}$$

El recíproco de la tasa de fallo es equivalente a la media de la distribución,  $MTTF = 1/\lambda$ . Esto significa que la distribución puede ser completamente definida en términos de  $MTTF$  o  $\lambda$ . La tasa de fallo es comúnmente expresada en fallos por millón o billón de horas.

Matemáticamente, la confiabilidad para una función en general se representa por la siguiente expresión:

$$R(t)=e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{1.11}$$

A partir de esta ecuación, se puede obtener la confiabilidad de cualquier componente o sistema cuya tasa de fallo esté representada por alguna distribución de probabilidad. Si la tasa de fallo está representada por una distribución exponencial, se tiene:

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \tag{1.12}$$

## 1.5 Sistemas reparables y no reparables

**Sistemas reparables.** Un sistema es reparable si regresa al estado de operación normal tras sufrir alguna falla. El parámetro asociado a un sistema reparable es el que representa al tiempo medio entre fallos (MTBF) y es aplicable cuando se esperan varias fallas en el sistema.

Tras una falla, el sistema regresa a operación normal ya sea por sustitución de componentes o reparo de los mismos. Una vez que el sistema ha sido reparado, puede volver a fallar después de tiempo determinado.

El tiempo que transcurre entre dos fallos se define como el tiempo de ciclo fallo-reparo. En la mayoría de los casos este tiempo disminuye de manera estocástica con la edad del sistema, el MTBF de un sistema está en función de su edad.

En un tiempo largo de operación y si todas las fallas del sistema pueden ser reparadas, el tiempo de ciclo fallo-reparo se considera constante con respecto a la edad del sistema, Se dice que el sistema ha alcanzado la condición estable.

Aunque teóricamente la condición de estado estable se alcanza en un tiempo infinito, para un sistema, cuyo tiempo fuera de operación es considerablemente pequeño en comparación al tiempo en operación, el estado estable se alcanza en un tiempo corto. Cabe señalar que el MTBF se calcula asumiendo que el sistema ha alcanzado el estado estable.

En un sistema reparable el tiempo de operación es equivalente al tiempo esperado de fallo (MTTF). Por otra parte, el tiempo fuera de operación consiste en el empleado por reparación y retraso. En caso de no existir retraso, el tiempo fuera de operación es equivalente al tiempo medio de reparo (MTTR).

Bajo condiciones de estado estable, se siguientes condiciones se cumplen:

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

$$Disponibilidad = MTTF / MTBF = MTTF / (MTTF + MTTR) \quad (1.13)$$

Otro parámetro importante para un sistema es el tiempo esperado a la primera falla (MTTFF).

**Sistemas no reparables.** Esta categoría incluye a todos aquellos sistemas que son imposibles de reparar o a los que fallan durante el tiempo de misión.

En este tipo de sistemas, el tiempo esperado de fallo (MTTF) es también el tiempo esperado al primer fallo (MTTFF), ya que el sistema puede fallar sólo una vez. En algunos textos se identifica un parámetro llamado tiempo esperado antes del fallo como MTBF (por sus siglas en inglés) este parámetro es en realidad MTTF; dado que

el MTBF significa y se interpreta como un parámetro completamente diferente ha sido causa de una gran fuente de confusión y errores significativos.

El hecho que un sistema sea no reparable puede llevar a una catástrofe, la pérdida del sistema, detener actividades productivas o producir material defectuoso. En este sentido, todo sistema debería considerarse como no reparable y analizarse de este modo.

## 1.6 Función estructural de un sistema

Todos los sistemas pueden ser divididos en “n” componentes llamados subsistemas. El comportamiento de cada componente puede ser identificado por una variable aleatoria:  $X_i$ , que toma el valor de  $x_i=1$  si los componentes se comportan de manera exitosa durante determinado tiempo ó  $x_i=0$  si el componente falla durante este tiempo. En general  $X_i$  es una variable binaria aleatoria y está definida por:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{Si el componente } i \text{ se comporta de manera satisfactoria durante el tiempo } [0, t] \\ 0, & \text{Si el componente } i \text{ falla durante el tiempo } [0, t] \end{cases} \quad (1.14)$$

El comportamiento del sistema está definido por el comportamiento de las variables binarias aleatorias  $\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , donde:

$$\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) = \begin{cases} 1, & \text{si el sistema opera satisfactoriamente durante el tiempo } [0, t] \\ 0, & \text{Si el sistema falla durante el tiempo } [0, t] \end{cases} \quad (1.15)$$

La función  $\varphi$  es llamada función de estructura del sistema y depende de las variables aleatorias de los n-componentes que la constituyen. Debido a que cada componente del sistema puede tomar el valor de 0 ó 1, la función  $\varphi$  está definida sobre  $2^n$  puntos.

Acorde a como un sistema es ensamblado, un sistema es clasificado en tres tipos básicos de los cuales se derivan muchos más. Los tipos básicos son los siguientes:

### 1.6.1 Sistemas en serie

Los sistemas en serie son los más simples y comunes de todas las configuraciones. Para un sistema en serie, se presenta un fallo si falla cualquiera de sus componentes; por el contrario el éxito del sistema ocurre si y sólo si todos los componentes se comportan de manera satisfactoria. La estructura de función para un sistema en serie está dada por:

$$\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) = X_1 X_2 \dots X_n \quad (1.16)$$

La forma gráfica para un sistema en serie es:

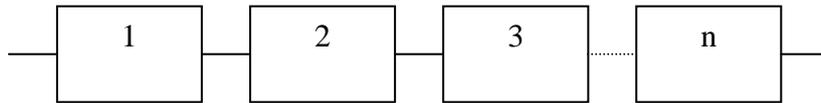


Fig 1.4 Sistema en Serie.

### 1.6.2 Sistemas en paralelo

Un sistema en paralelo con “n” componentes fallará si todos los componentes que lo constituyen fallan; dicho de otra forma, un sistema en paralelo opera satisfactoriamente si por lo menos uno de sus “n” componentes opera en forma satisfactoria. Esta propiedad intrínseca a la construcción de los sistemas en paralelo es conocida como redundancia.

La estructura de función para un sistema en paralelo, está dada por:

$$\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2) \dots (1 - X_n) \quad (1.17)$$

La forma gráfica de un sistema en paralelo es:

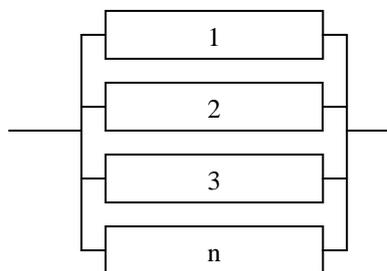


Fig 1.5 Sistema en Paralelo.

### 1.6.3 Sistemas tipo “k” de “n” salidas

Algunos sistemas están ensamblados de tal forma que opera satisfactoriamente si un número de mayor o igual a “k” de “n” componentes funcionan adecuadamente. El sistema en serie puede entrar en esta clasificación de sistema con  $k=n$ , y el sistema en paralelo con  $k=1$ . la estructura de función para un sistema de este tipo se define de la siguiente forma:

$$\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) = \begin{cases} 1, & \text{Si } \sum_{i=1}^n X_i \geq k \\ 0, & \text{si } \sum_{i=1}^n X_i < k \end{cases} \quad (1.18)$$

### 1.7 Confiabilidad de un sistema

La estructura de función de un sistema que contiene “n” componentes es una variable aleatoria binaria que toma los valores de 0 ó 1. La confiabilidad de un sistema se expresa como sigue:

$$R = P\{\varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1\} \quad (1.19)$$

Para un sistema en serie, la confiabilidad esta dada por la siguiente ecuación:

$$R = P\{X_1 X_2 \dots X_n = 1\} = P\{X_1 = 1, X_2 = 1, \dots, X_n = 1\} \quad (1.20)$$

Si los componentes del sistema no interactúan unos con otros son llamados independientes. La expresión para la confiabilidad es la siguiente:

$$R = P\{X_1 = 1\}P\{X_2 = 1\} \dots P\{X_n = 1\} \quad (1.21)$$

Debe notarse que si los componentes en un sistema son independientes, la confiabilidad del sistema está en función de la distribución de probabilidad de  $X_i$ .

Para un sistema es independiente, la distribución de probabilidad de una variable binaria aleatoria  $X_i$ , se expresa como sigue:

$$P\{X_i=1\}=p_i$$

y

$$P\{X_i = 0\} = 1 - p_i \quad (1.22)$$

Para este tipo de sistemas, la confiabilidad está en función de las probabilidades individuales  $p_i$ :

$$R = R(p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (1.23)$$

### **1.7.1 Confiabilidad de sistemas en serie**

La confiabilidad para un sistema en serie, es el producto de los valores de probabilidad de cada uno de sus componentes.

$$\begin{aligned} R(p_1, p_2, \dots, p_n) &= P\{\phi(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1\} \\ &= P\{X_1 X_2 \dots X_n = 1\} \\ &= P\{X_1 = 1, X_2 = 1, \dots, X_n = 1\} \\ &= P\{X_1 = 1\} P\{X_2 = 1\} \dots P\{X_n = 1\} \\ &= p_1 p_2 \dots p_n \end{aligned} \quad (1.24)$$

### **1.7.2 Confiabilidad de sistemas en paralelo**

La evaluación de la confiabilidad de un sistema en paralelo está dado por:

$$\begin{aligned} R(p_1, p_2, \dots, p_n) &= P\{\phi(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1\} \\ &= 1 - P\{\vee X_i = 0\} \\ &= 1 - P\{X_1 = 0, X_2 = 0, \dots, X_n = 0\} \\ &= 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_n) \end{aligned} \quad (1.25)$$

### **1.7.3 Confiabilidad en sistemas tipo "k" de "n" salidas**

La confiabilidad para este tipo de sistemas está dado por:

$$R(p_1, p_2, \dots, p_n) = P\left\{\sum_{i=1}^n X_i \geq k\right\} \quad (1.26)$$

La evaluación de esta expresión en general es difícil, excepto en el caso en que se cumple que  $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$ . Bajo este supuesto la función de distribución es llamada binomial con parámetros  $n$  y  $p$ , por lo que la evaluación de la confiabilidad queda determinado por:

$$R(p, p, \dots, p) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (1.27)$$

### **1.8 Parámetros probabilísticos para los componentes de un sistema**

A pesar que las definiciones de los parámetros probabilísticos para los componentes de un sistema son semejantes a las proporcionadas para el sistema; se brindan los parámetros específicos que gobiernan el comportamiento de los componentes.

El inicio del comportamiento de un sistema se asume en un tiempo arbitrario  $t=0$ , en el cual la componente se encuentra en estado normal o de fallo; el comportamiento anterior de la componente a este tiempo  $t=0$  es ignorado. Un fallo o reparo de una componente ocurre después del tiempo asignado como origen.

Bajo estos supuestos, se definen los siguientes parámetros:

*A(t) = Disponibilidad al tiempo t*

Probabilidad que el componente se encuentre funcionando en estado normal al tiempo  $t$ , dado que operaba satisfactoriamente al tiempo 0.

*R(t) = Confiabilidad al tiempo t*

Probabilidad que el componente se encuentre funcionando en estado normal en el intervalo de tiempo  $(0, t]$ , dado que operaba de manera satisfactoria al tiempo 0.

Un componente contribuye al valor de la disponibilidad  $A(t)$  pero no al valor de la confiabilidad  $R(t)$ , ya que si un componente falla antes del tiempo  $t$ , puede ser reparado y funcionar en forma normal al tiempo  $t$ .

De esta forma el valor de la disponibilidad  $A(t)$  es mayor o igual al valor de la confiabilidad  $R(t)$ .

$$A(t) \geq R(t) \quad (1.28)$$

El valor de disponibilidad es igual al de la confiabilidad para un componente no reparable, ya que el componente se encuentra en

estado normal al tiempo  $t$  si y sólo si ha funcionado adecuadamente hasta el tiempo  $t$ .

$$A(t) = R(t), \text{ para componentes no reparables.} \quad (1.29)$$

La disponibilidad para un componente no reparable decrece hasta cero conforme el tiempo se hace más grande, en tanto la disponibilidad para un sistema reparable converge a un valor positivo. Las curvas típicas para el valor de  $A(t)$  se muestran en la siguiente figura:

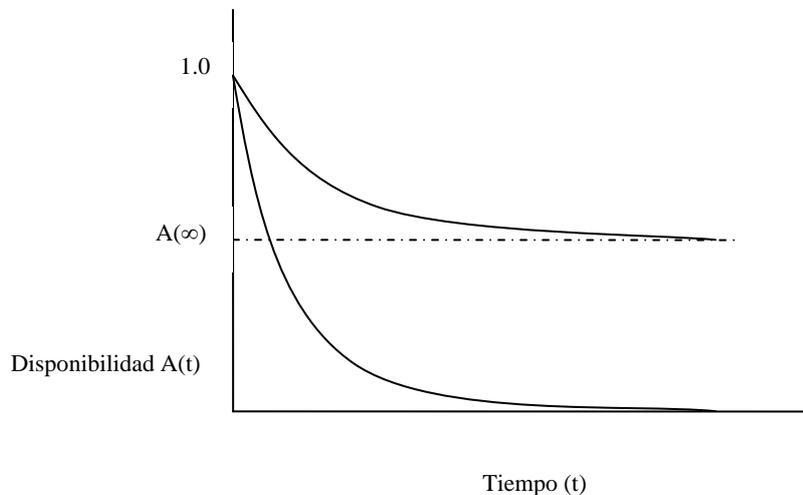


Figura 1.6 Curvas de disponibilidad  $A(t)$   
 Fuente "Reliability Engineering and Risk Assessment"  
 Henley, Kumamoto Pág 180

$Q(t) =$  No disponibilidad al tiempo  $t$

Probabilidad que el componente se encuentre en estado de fallo al tiempo  $t$ , dado que se encontraba en estado de funcionamiento normal al tiempo cero.

Un componente se encuentra en estado de funcionamiento normal o en estado de falla al tiempo  $t$ , la no disponibilidad  $Q(t)$  es el complemento de la disponibilidad:

$$A(t) + Q(t) = 1 \quad (1.30)$$

$F(t) =$  No confiabilidad.

Probabilidad que el componente falle en el intervalo de tiempo  $[0, t)$  dado que se encontraba en operación normal al tiempo 0.

La confiabilidad y no confiabilidad son eventos complementarios:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.31)$$

La no disponibilidad es menor o igual al valor de la no confiabilidad:

$$Q(t) \leq F(t) \quad (1.32)$$

El caso de igualdad, nuevamente se da en componentes no reparables:

$$Q(t) = F(t), \text{ para componentes no reparables} \quad (1.33)$$

El valor de la no disponibilidad de un componente no reparable se aproxima a la unidad conforme el tiempo  $t$  se hace más grande, en tanto el valor de la no disponibilidad para un componente reparable se busca sea pequeño.

$\lambda(t)$  = *parámetro de falla condicional*

Probabilidad que un componente falle durante el intervalo  $[t, t+dt]$ , dado que se encontraba en estado normal al tiempo cero y en estado normal al tiempo  $t$ .

$r(t)$  = *tasa de fallo*

Probabilidad que un componente falle durante el intervalo  $[t, t+dt]$ , dado que el componente fue reparado al tiempo cero y ha sobrevivido al tiempo  $t$ .

La cantidad  $\lambda(t) dt$  difiere de  $r(t)dt$  debido a que la tasa de fallo implica un funcionamiento normal hasta el tiempo  $t$ , se asume que no existe ninguna falla en el intervalo  $[0, t]$ .

$$\lambda(t) \neq r(t), \text{ para el caso general} \quad (1.34)$$

El parámetro fallo condicional coincide con la tasa de fallo si la componente es no reparable, ya que está en estado normal al tiempo  $t$  si y sólo si ha estado en estado normal hasta el tiempo  $t$ .

$$\lambda(t) = r(t), \text{ para componentes no reparables} \quad (1.35)$$

Si la tasa de fallo es constante, el parámetro de falla condicional toma el valor y nombre de tasa de fallo.

$$\lambda(t) = r, \text{ para un valor constante de tasa de fallo } r \quad (1.36)$$

$\mu(t)$  = *parámetro condicional de reparo.*

Probabilidad que un componente sea reparado por unidad de tiempo al tiempo  $t$ , dado que fue reparado al tiempo cero y está en estado de fallo al tiempo  $t$ .

$m(t)$  = *tasa de reparo.*

Probabilidad que un componente sea reparado por unidad de tiempo al tiempo  $t$ , dado que el componente falló al tiempo 0 y ha estado en estado de fallo al tiempo  $t$ .

Para componentes no reparables, ambos parámetros toman el valor de cero.

$$\mu(t) = m(t) = 0, \text{ para componentes no reparables} \quad (1.37)$$

### **1.9 Sistemas industriales**

Se define a un sistema industrial como una entidad física formada por partes organizadas e interrelacionadas cuya finalidad es transformar un bien o bienes de entrada (llamada materia prima), en un producto de salida con características físicas, químicas o biológicas diferentes al de la materia prima y diseñados para cumplir un fin predeterminado. El producto posee un valor económico más elevado del que tenía la materia prima que lo constituyó.

La principal meta para un sistema industrial, es que opere sin contratiempos y en forma ininterrumpida durante el tiempo que dure la misión. Es por ello que todo sistema se considera como no reparable para el tiempo de operación y en este sentido se realiza el análisis.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Técnicas de análisis

La metodología propuesta en este trabajo, se basa en algunas de las técnicas teóricas usadas en el estudio de análisis de riesgo y confiabilidad, las técnicas más importantes son:

#### 2.1.1 Evaluación de confiabilidad

*Predicción de confiabilidad.* Técnica usada para predecir tasas de fallo de componentes y/o sistemas. Las tasas de fallo así obtenidas son tratadas a través de computadores usando modelos estadísticos basados en parámetros intrínsecos al componente y factores ambientales.

*Diagrama de bloques de confiabilidad (RBD).* Usado para analizar sistemas complejos que empleen redundancia y otros métodos para incrementar la confiabilidad. RBD usan métodos sofisticados de modelación, incluyendo simulación.

*Análisis Markoviano.* Esta técnica puede ser utilizada para el análisis de sistemas que presenten dependencia. La aplicación es básicamente teórica.

#### 2.1.2 Análisis de riesgo

Las técnicas clasificadas en esta categoría, son usadas para minimizar factores de riesgo, son usadas extensamente para analizar la seguridad en sistemas.

*Análisis de efectos de modo de fallo (FMEA).* Usado para identificar los efectos y gravedad de algún fallo sobre el sistema.

*Análisis de árbol de fallo (FTA).* Usado para identificar todas las causas posibles de fallo en un sistema.

*Análisis de riesgo de factores humanos.* Usado para identificar los efectos causados por errores humanos y que tan críticos son sobre un proceso.

#### 2.1.3 Herramientas de uso específico

*Acciones para el reporte, análisis y corrección de fallas en sistemas (FRACAS).* Herramienta usada para la captura y reporte de fallos y acciones correctivas.

*Análisis de Mantenibilidad.* Usado para determinar el tiempo medio a reparar (MTTR) para diversos componentes.

*Análisis de ciclo de vida.* Usado para determinar el ciclo de vida de un sistema, así como los costos relativos a tasas de fallo y reparo.

*Optimización de redundancias.* Técnica para definir la cantidad óptima de circuitos redundantes que un sistema requiere acorde a costos y estudios de confiabilidad.

## **2.2 Metodología propuesta**

Basada en algunas de las técnicas anteriormente descritas, la metodología propuesta es:

1. Entender el funcionamiento del sistema.
2. Consultar con los expertos involucrados al área en estudio.
3. Elaborar y validar un árbol de fallo, que brindará el análisis cualitativo del sistema en estudio.
4. Recabar datos para que, en base al árbol de fallo, se realice el análisis cuantitativo de la confiabilidad.
5. Realizar un cálculo de disponibilidad del sistema a un horizonte determinado.
6. Basado en el resultado arrojado por el estudio de disponibilidad, realizar el cálculo de confiabilidad.
7. Realizar una validación del estudio confiabilidad-disponibilidad; vía una simulación montecarlo.
8. Presentar resultados.

El objetivo del resto de este capítulo es detallar cada uno de los puntos presentados en esta metodología.

## **2.3 Entender el funcionamiento del sistema**

Dada la gran gama de sistemas industriales este punto parece difícil cuando no imposible de alcanzar, debe notarse que no se pide que se domine a la perfección el funcionamiento de de todos los sistemas industriales o de aquel por analizar, pero si tener una idea de la problemática que da pie al estudios de confiabilidad así como de la interrelación de los componentes del sistema.

El profesionalista dedicado al estudio de confiabilidad y más aún el experto en investigación de operaciones tiene la obligación de aportar su experiencia y conocimientos en la frecuentemente difícil tarea de hallar las causas de un posible fallo en el sistema, así como en las soluciones.

Trabajar durante mucho tiempo con un área en específica si bien logra convertir a cualquier persona en un experto en el tema, también causa que se olviden puntos por ser obvios, superfluos o no ser interesantes para el personal a cargo.

El dejar el trabajo de identificar las áreas potenciales de riesgo en manos del personal que labora en el sistema no es recomendable; si bien el laborar durante mucho tiempo en un área vuelve a cualquier persona un experto, también causa que se pasen por alto puntos por ser considerados superfluos, se incluyan elementos innecesarios, que el sistema o los datos no representen la realidad, arrojando datos y por tanto un estudio erróneo.

La persona o equipo encargados del estudio de confiabilidad deben encabezar el proyecto desde el inicio y no dedicarse simplemente a realizar un cálculo y reportar resultados.

## **2.4 Consulta con expertos**

Debido a que tratamos el área productiva de un sistema industrial, el grupo de expertos se enfoca a todos aquellos que participan en el área de producción y además pueden brindarnos información valiosa.

Este grupo involucra operadores, diseñadores, personal de mantenimiento, ingenieros y supervisores. El incrementar el abanico de involucrados resultará en un estudio exitoso.

En medida de lo posible debe tenerse contacto frecuente con el grupo de expertos involucrados, así como el recibir retroalimentación; la tarea no es sencilla ya que requiere de tiempo y tacto, pero conducido adecuadamente los beneficios son enormes; el más notorio es realizar un estudio exitoso, además de crear en el personal el sentimiento de haber estado involucrado y tomado en cuenta, lo que facilitaría en el futuro tomar políticas preventivas y correctivas que siempre involucran al personal.

Los dos incisos anteriores convergen en la construcción de un árbol de fallo que represente el sistema. Un buen analista debe poseer una mente lógica capaz de entender la estructura e interacción de los elementos del sistema, conocer las dependencias entre los componentes del sistema, los parámetros de confiabilidad, y las condiciones bajo las cuales los componentes son considerados en fallo. Un buen analista de sistemas industriales debe tener buenos conocimientos de sistemas mecánicos, eléctricos, control, químicos estructurales, también debe entender las interacciones humanas y procedimientos.

## 2.5 Árbol de fallo

El análisis por árbol de fallo (FTA) es una de las técnicas más importantes y reconocidas para evaluar seguridad y confiabilidad en el diseño, desarrollo y operación de sistemas. Durante más de 40 años, FTA ha sido ampliamente usada en la industria nuclear y aeroespacial ya que ilustra en forma gráfica la forma en que un sistema puede fallar y las causas que lo ocasionen.

Un árbol de fallo muestra en forma visual y concisa la serie de combinaciones que llevan al sistema a un evento predefinido y por lo general indeseable, FTA es usada para:

- Identificar componentes críticos en seguridad.
- Verificar requerimientos del producto.
- Certificar la confiabilidad del producto.
- Realizar análisis de riesgo.
- Investigar incidentes/accidentes.
- Evaluar cambios en el diseño.
- Mostrar las causas y consecuencias de un evento.
- Identificar causas comunes a las fallas.

FTA es un método de análisis deductivo que comienza con una conclusión general (evento indeseable para el sistema) e intenta determinar las causas específicas de esta conclusión. Esta técnica está basada en una serie de reglas y símbolos lógicos obtenidos de la teoría de probabilidad y el álgebra booleana.

FTA utiliza una aproximación de “arriba hacia abajo” para generar un modelo que sirve de base para la evaluación cualitativa y cuantitativa del sistema.

El evento indeseable del sistema es llamado evento tope. Conforme se desciende en la construcción del árbol, las partes inferiores son desglosadas hasta determinar las causas básicas que provocan el evento tope, las causas son llamadas eventos básicos. Símbolos lógicos llamados compuertas son la vía a través de las cuales se unen a los eventos básicos con el evento tope.

### 2.5.1 Construcción del árbol de fallo

Como se indicó anteriormente, construir un árbol de fallo útil implica que el analista comprenda al sistema y la forma en que interactúan sus componentes.

Para la construcción de un árbol de fallo de un sistema en estudio, se propone realizar los siguientes pasos:

- Especifique un evento tope que sea claro y concreto, evite definir un evento tope que sea largo, complejo y que cause ambigüedades.
- A partir de el evento tope, Ramifique eventos inferiores que llevarán a la ocurrencia de dicho evento tope. No cometa el error de trasladar el diagrama de ingeniería al árbol de fallo.
- Divida al sistema en estudio en subsistemas, de forma que reduzcan el tamaño y complejidad del mismo.
- La subdivisión del sistema debe realizarse por áreas que involucren interrelación y no por áreas de especialización.
- Determine los eventos básicos.
- Es importante definir el grado de detalle en los componentes del sistema que constituirá un evento básico. Profundizar en exceso en los componentes del sistema, harán el estudio muy complicado y en general no contribuirá a una mayor precisión del análisis.
- Las ramas o subsistemas, así como los eventos básicos se interrelacionan entre ellos y con el evento tope a través de compuertas lógicas.
- Realice constante retroalimentación, con la finalidad de saber si el árbol construido refleja la realidad.
- No tema equivocarse. Puede hacerlo todas las veces que desee, siempre y cuando lo haga antes de concluir con la construcción del árbol sobre el que recaerá el análisis.

Un árbol de fallo consta desde unos cuantos elementos hasta miles.

### **2.5.2 Elementos del árbol de fallo**

Los elementos de que constituyen a todo árbol de fallo son dos: eventos y compuertas.

*Evento básico.* En evento básico representa el nivel más elemental en un árbol de fallo. Un evento básico no tienen entradas, simplemente representa la ocurrencia de un evento (fallo) en el sistema analizado. Un evento básico se representa por un círculo en el árbol de fallo.

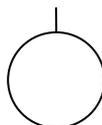


Figura 2.1 Evento básico.

*Evento indeterminado.* Se clasifican dentro de este tipo a todos los eventos cuya información no está disponible como para incluirlo dentro del análisis cuantitativo. Pese a que un evento indeterminado es similar a un evento básico, el hecho de representarlo con diferente símbolo indica que el evento puede ser analizado y es importante, pero por alguna razón y para un análisis en particular no se ha hecho.

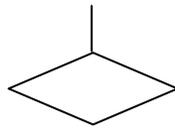


Figura 2.2 Evento indeterminado.

*Evento condicional.* Usado con una compuerta de inhibición (la cual se describe más adelante), este tipo de evento brinda una salida cuando se cumple un evento de entrada y una condicional asociada a ese evento es satisfecha.

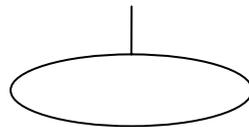


Figura 2.3 Evento condicional.

*Evento house.* Se usa para determinar eventos tales como:

- Representar eventos que normalmente ocurren.
- Habilitar o deshabilitar partes del árbol de fallo para hacerlos funcionales o no funcionales.
- Representar disparos de un evento.



Figura 2.4 Evento house.

Las compuertas son usadas para relacionar los eventos de falla en los diferentes niveles del árbol de fallo.

Para todas las compuertas, los eventos de salida pueden ser el evento tope o un evento intermedio. Los eventos de entrada pueden ser eventos básicos, intermedios (salidas de otras compuertas) o combinaciones de ambos.

*Compuerta AND.* La compuerta AND es usada para indicar que la salida ocurre si y sólo si todos los eventos de entrada ocurren. Debe haber al menos dos eventos de entrada en una compuerta AND.

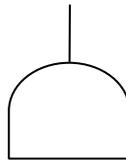


Figura 2.5 Compuerta AND

Todos los eventos deben ser verdad para que la salida sea verdad. La ecuación de álgebra Booleana para la compuerta AND es  $T=A*B$ . La tabla de verdad para la compuerta AND es la siguiente:

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Salida</b>
T	T	T
T	F	F
F	T	F
F	F	F

Tabla 2.1 Tabla de verdad para la compuerta AND.

*Compuerta OR.* En la compuerta OR la salida ocurre si y sólo si al menos una de los eventos de entrada ocurren. Debe haber al menos dos entradas para una compuerta OR.

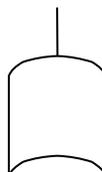


Figura 2.6 Compuerta OR.

La ecuación de álgebra booleana para la compuerta OR es  $T = A+B$ .

La tabla de verdad para la compuerta OR es la que se muestra a continuación.

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Salida</b>
T	T	T
T	F	T
F	T	T
F	F	F

Tabla 2.2 Tabla de verdad para la compuerta OR.

Compuerta tipo “m” de “n”. Esta compuerta es usada para indicar que la salida ocurrirá si y sólo si al menos “m” de los “n” eventos de entrada ocurren. Los eventos de entrada deben estar presentes al mismo tiempo. Cuando m=1, esta compuerta es la compuerta OR.

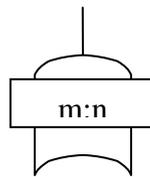


Figura 2.7 Compuerta tipo “m” de “n”

Si m=2 y n=3, dos eventos deben ser verdad para que la salida sea verdadera. Si cero o un eventos de entrada es verdad, la salida es falsa.

La ecuación de álgebra booleana para una compuerta con n=3 es:  
 $T = (A*B) + (B*C) + (C*A)$ .

La tabla de verdad para una compuerta 2 de 3 eventos es:

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Salida</b>
T	T	T	T
T	T	F	T
T	F	T	T
T	F	F	F
F	T	T	T
F	T	F	F
F	F	T	F
F	F	F	F

Tabla 2.3 Tabla de verdad para la compuerta tipo “m” de “n”.

*Compuerta de inhibición.* Esta compuerta es usada para indicar que la salida ocurre cuando los eventos de entrada (I1 e I2) ocurren y la condición de entrada (C) es satisfecha. Una compuerta de inhibición es semejante a una compuerta AND con una condición. La compuerta de inhibición está acompañada siempre con un evento condicional.



Figura 2.8 Compuerta de inhibición

Si un evento de entrada es falso, la salida es falsa. Si todos los eventos de entrada así como la condición de entrada es verdadera, la salida es verdadera.

La ecuación booleana para este tipo de compuerta es  $T = (I1, I2) * C$ . La tabla de verdad es la siguiente:

<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>C</b>	<b>Salida</b>
T	T	T	T
T	T	F	F
T	F	T	F
T	F	F	F
F	T	T	F
F	T	F	F
F	F	T	F
F	F	F	F

Tabla 2.4 Tabla de verdad para una compuerta de inhibición.

*Compuerta de transferencia.* La compuerta de transferencia es usada para unir áreas separadas de un árbol de fallo. La compuerta de transferencia de entrada es ligada a la compuerta de transferencia de salida, que representa la compuerta tope de otro árbol.

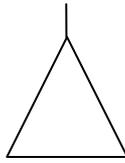


Figura 2.9 Compuerta de transferencia.

Existen dos usos principales para las compuertas de transferencia:

Un árbol de fallo puede ser demasiado extenso para que quepa en una hoja. Se puede usar compuertas de transferencia para organizar porciones de un árbol de fallo demasiado extenso en varias hojas.

La lógica del árbol de fallo puede ser usado en diferentes partes del árbol de fallo. La compuerta de transferencia es usada para trasladar la lógica de una parte del árbol hacia alguna otra parte. Así mismo, esta compuerta es usada para representar partes del sistema que se repiten.

*Compuerta tipo rectángulo.* Esta compuerta es usada para escribir comentarios. Esta compuerta no tiene datos asociados y tampoco participa en el efecto de cálculo. Facilita la comprensión del árbol de fallo e identifica partes del sistema.



Figura 2.10 Compuerta tipo rectángulo.

En años recientes, el número de compuertas se ha incrementado para definir eventos específicos de áreas de análisis de riesgo para sistemas nucleares. Dichas compuertas no se incluyen en esta recopilación ya que en primera instancia debe demostrarse su efectividad y uso en confiabilidad de sistemas industriales para fines de productividad y calidad, que es el objetivo de este trabajo.

La estructura fundamental de un árbol de fallo se muestra en la siguiente figura, se aprecia que el evento indeseado aparece como evento tope, y se despliega hasta eventos básicos a través de compuertas lógicas y conectores.

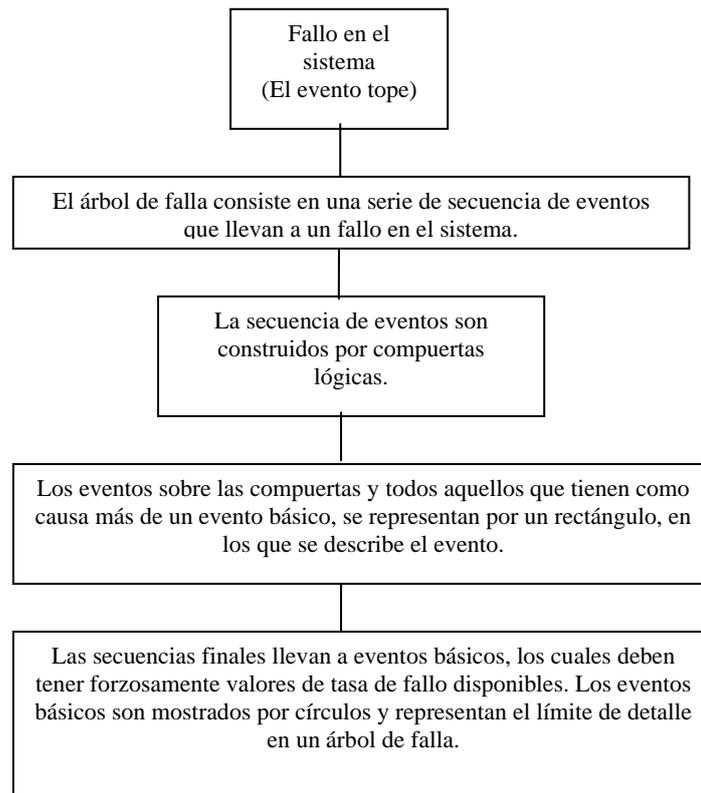


Figura 2.11 Estructura de un árbol de fallo  
Fuente: "Reliability Engineering and Risk Assessment"  
Henley, Kumamoto Pag. 47

## 2.6 Recolección de datos

El segundo pilar sobre el cual descansa un estudio de confiabilidad, son los valores de los eventos básicos utilizados para realizar el análisis cuantitativo del sistema en estudio.

Existe una enorme discrepancia sobre la fuente de la cual deben provenir los datos, la forma en que deben ser recolectarlos y la manera a ser empleados, en este inciso se discuten los puntos anteriores.

En general los tiempos de fallo (y reparo) para sistemas y componentes se comportan de manera aleatoria y por lo tanto son impredecibles. Pese a que los tiempos de fallo son aleatorios, pueden ser modelados usando distribuciones estadísticas ampliamente estudiadas en el campo de las matemáticas. De los datos recabados se desprenderá también el valor de la tasa de fallo.

Recabar datos es sencillo, recabar buenos datos no lo es; en la realidad es complicado y de hecho esta actividad requiere de un plan

determinado y construido cuidadosamente; un error enorme sería tomar un par de datos de un reporte, analizarlos en un paquete estadístico y a partir de allí deducir la distribución de fallo (reparo) y la tasa de fallo (reparo).

Los datos provienen de dos fuentes: de pruebas experimentales o de pruebas operacionales. Como ejemplo de los primeros se encuentran las pruebas que bajo condiciones estrictamente controladas y diversos escenarios se realizan en los laboratorios de Sandía (USA); la precisión y calidad de los datos es altísima, por desgracia, dado los altos costos de este tipo de análisis, sólo pequeños sistemas y componentes pueden ser analizados.

La segunda fuente de datos, es la más utilizada y conveniente para un estudio industrial: la toma de datos en campo.

Abernethy (1996) señala que el adquirir datos de un equipo o sistema en campo requiere tres características básicas (puntos 1 al 3) y para fines comerciales añade dos más (puntos 4 y 5).

- 1) Defina un tiempo de origen que no sea ambiguo.
- 2) Defina una escala de tiempo.
- 3) El significado de "fallo" debe ser completamente entendido.
- 4) Para cada fallo, determine el costo de la consecuencia.
- 5) Proporcione los datos a expertos para su análisis y posterior uso.

Es estricto el cumplir con todos los requisitos anteriores, lo que debe quedar claro es que el contar con muchos datos (o peor aún pocos datos) tomados, registrados y analizados de una manera pobre, es absolutamente inútil y no llevará a buen fin el estudio de confiabilidad.

Diversos bancos de datos han sido construidos durante años a partir de recolección y análisis metódico de tiempos de fallo para diversos ramas industriales, dichos datos son usados ampliamente en los estudios de confiabilidad. La duda principal es el saber si los datos, recopilados de sistemas que quizá difieran enormemente del analizado puedan ser tomados y usados indiscriminadamente, además si el resultado obtenido reflejará al sistema en estudio.

Es evidente, que un estudio ideal implica el realizarlo con datos del sistema en estudio y bajo las condiciones que rigen la operación del mismo (aunque esto implica que el sistema falle), pero si estos datos son pobres o no existen, el utilizar datos de un banco es la mejor y en todo caso la única opción.

Las más importantes fuentes de datos son las siguientes:

US MIL-HDBK-217

HRD3 (British Telecom)  
ANSI/IEEE STD 500 (USA)  
USAF RADDC (Nonelectric parts handbook, USA)  
CNET (Francia)  
OREDA (Det Norske Veritas)  
CEA (Canadian Electrical Association)  
NERC-GADS (North American Electricity Reliability Council)  
WASH 1400 (Failure Data)  
UKAEE (United Kingdom Atomic Energy Establishment)  
Instrument Maintenance Repair slips at large Plants.

La mayoría de estos bancos y fuentes de datos muestran las condiciones aproximadas de operación, por lo que es importante verificar si las mismas corresponden al sistema en estudio, no se deben tomar los datos en forma indiscriminada sino tratar de aproximarlos a las condiciones bajo las cuales opera el sistema a analizar.

Finalmente, se recomienda ampliamente el elaborar un plan de recolección y análisis de datos.

## **2.7 Cálculo de disponibilidad**

Tal y como se definió, la disponibilidad brinda la probabilidad que el sistema opere correctamente a un tiempo  $t$ . Si el análisis se realiza para sistemas no reparables, el valor de probabilidad obtenido se relaciona con el tiempo al cual el sistema reportará la primera falla.

El horizonte de tiempo para el cual se realiza el análisis de confiabilidad, depende de la política de operación y de la expectativa de tiempo en que se espera el sistema no falle. Si el valor de disponibilidad es alto para este horizonte de tiempo, se amplía hasta encontrar un valor de disponibilidad que se considere tan bajo como para causar un fallo del sistema.

El cálculo de la disponibilidad del sistema se basa en el árbol de fallo construido, el cálculo en general es sencillo y las ecuaciones que emplea se basan en la compuerta involucrada y las relaciones de álgebra booleana asociada a la misma.

El fallo del sistema puede ser descrito como la combinación de los árboles de fallo de los subsistemas, unidos por una compuerta tipo OR. Por la característica de la compuerta tipo OR, la ocurrencia del fallo del sistema no significa siempre la ocurrencia del fallo de un subsistema en particular, por otro lado, el fallo de un subsistema si implica el fallo de la totalidad del sistema.

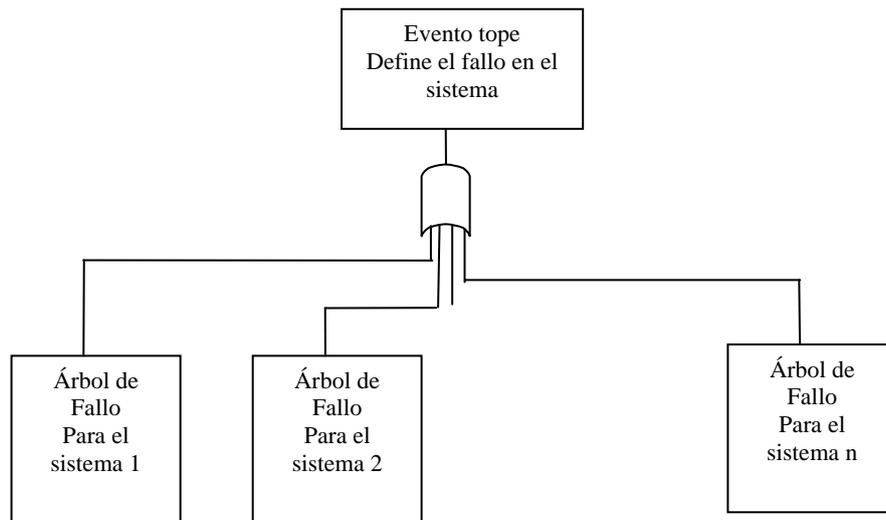


Figura 2.12 Árbol de fallo del sistema en general, indica los fallos de los subsistemas individuales unidos por una compuerta tipo OR  
 Fuente: "Reliability Engineering and Risk Assessment"  
 Henley- Kumamoto, pag. 289

### 2.7.1 Eventos básicos independientes

Generalmente, se considera que los eventos básicos  $B_1, B_2, \dots, B_n$  son independientes, lo que significa que el comportamiento de un evento básico no se ve afectado por la ocurrencia de otros eventos básicos

Para eventos independientes básicos, la existencia simultánea de probabilidad  $\Pr(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n)$  se reduce a:

$$\Pr(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) = \Pr(B_1) \Pr(B_2) \dots \Pr(B_n) \quad (2.1)$$

### 2.7.2 Sistema con compuerta tipo AND

La figura 2.13 muestra un árbol de fallo para un sistema con una compuerta AND. La ocurrencia simultánea de los eventos básicos  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , resulta en la ocurrencia del evento tope. La no disponibilidad del sistema  $Q_s(t)$  está dada por la probabilidad que todos los eventos básicos existan al tiempo  $t$ :

$$\begin{aligned} Q_s(t) &= \Pr(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) \\ &= \Pr(B_1) \Pr(B_2) \dots \Pr(B_n) \end{aligned}$$

(2.2)

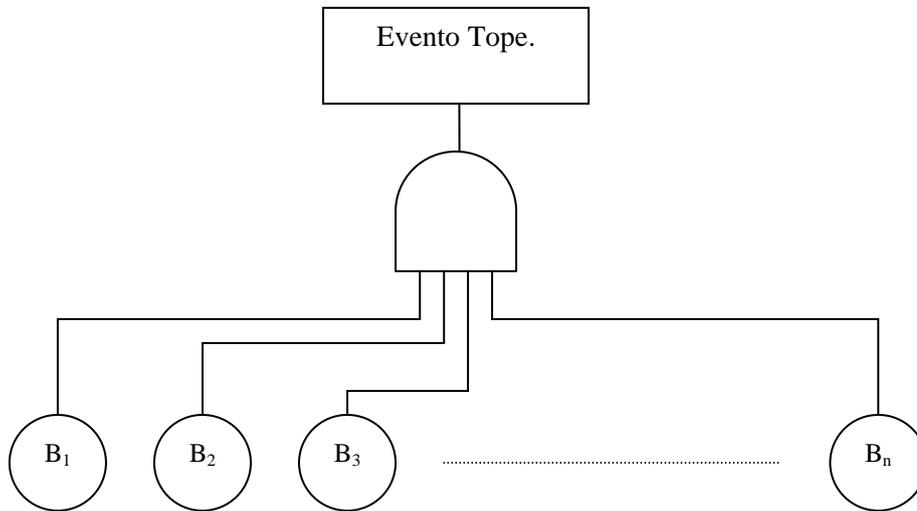


Figura 2.13 Árbol de Fallo con compuerta AND  
Fuente: "Reliability Engineering and Risk Assessment"  
Henley, Kumamoto pag 292

### 2.7.3 Sistema con compuerta tipo OR

En la figura 2.14 se muestra que el evento tope ocurrirá al tiempo  $t$  si y sólo si al menos uno de los eventos básicos existen al tiempo  $t$ . La disponibilidad  $A_s(t)$  y la no disponibilidad  $Q_s(t)$ , están dados por:

$$A_s(t) = \Pr(\overline{B_1} \cap \overline{B_2} \cap \dots \cap \overline{B_n})$$
$$Q_s(t) = \Pr(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n)$$

(2.3)

Donde el símbolo  $\cup$  representa la unión de los eventos y  $\overline{B_i}$  representa el complemento del evento  $B_i$ , y representa la no ocurrencia del evento  $B_i$  al tiempo  $t$ . La independencia de los eventos  $B_1, \dots, B_n$ , implica la independencia de los eventos complementarios  $\overline{B_1}, \dots, \overline{B_n}$ , de esta manera  $A_s(t)$  se reescribe:

$$A_s(t) = \Pr(\overline{B_1}) \Pr(\overline{B_2}) \dots \Pr(\overline{B_n})$$
$$= [1 - \Pr(B_1)] [1 - \Pr(B_2)] \dots [1 - \Pr(B_n)]$$

(2.4)

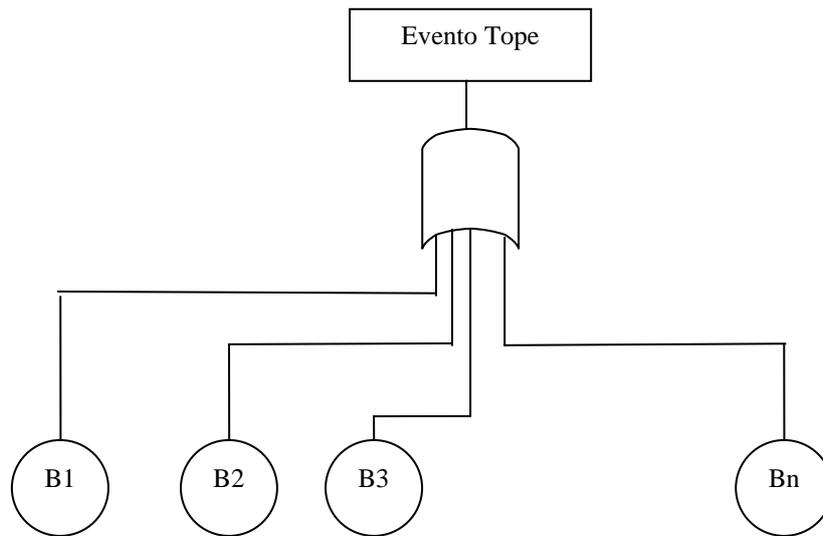


Figura 2.14 Árbol de fallo con compuerta tipo OR.  
 Fuente: "Reliability Engineering and Risk Assessment"  
 Henley-Kumamoto pag 293

La no disponibilidad se calcula:

$$\begin{aligned}
 Q_s(t) &= \Pr(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n) \\
 &= 1 - A_s(t) \\
 &= 1 - [1 - \Pr(B_1)][1 - \Pr(B_2)] \dots [1 - \Pr(B_n)]
 \end{aligned}$$

(2.5)

#### 2.7.4 Sistema con compuerta tipo "m" de "n"

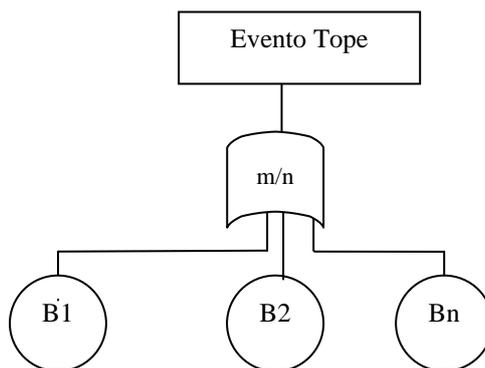


Figura 2.15 Árbol de fallo con compuerta tipo "m" de "n".  
 Fuente: "Reliability Engineering and Risk Assessment"  
 Henley-Kumamoto pag 293

La compuerta se puede descomponer en sus equivalentes de compuertas AND y OR, la aplicación directa de la distribución

binomial de Bernoulli la cual asume que todos los eventos primarios poseen la misma probabilidad  $Q$ .

Dado que el evento tope ocurrirá si más de los “ $m$ ” de “ $n$ ” eventos básicos ocurren. De esta manera es necesario sumar la ecuación binomial sobre el espectro de “ $k$ ” sucesos.

$$Q_s(t) = \Pr(m \leq k \leq n) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} Q^k (1-Q)^{n-k} \quad (2.6)$$

Cualquier sistema esta compuesto por la combinación de una o más de las compuertas indicadas en este inciso. Por lo cual el cálculo se limita a sustituir la probabilidad de ocurrencia del evento básico y aplicar las leyes del álgebra booleana mostradas.

## 2.8 Cálculo de confiabilidad

El análisis de confiabilidad sirve para identificar la o las partes del sistema que son débiles y tienen un peso mayor en el fallo del sistema.

Para realizar un estudio de Confiabilidad, se emplea la técnica alemana conocida como KITT (kinetic Tree Theory), utilizando conjuntos de corte.

### 2.8.1 La técnica KITT

La técnica KITT (kinetic tree Theory) es usada para evaluar parámetros probabilísticos para eventos básicos independientes, los cuales pueden ser reparables o no reparables; para ello se necesitan los valores para las tasas de fallo ( $\lambda$ ) y reparo ( $\mu$ ), y que estos valores sean constantes.

La técnica KITT requiere también como entrada los conjuntos de corte mínimos, todos los tipos de compuertas son permitidas.

Como primer paso, la técnica calcula los parámetros de cada evento básico y conjunto de corte, una vez hecho esto, calcula el valor del sistema e inclusive se pueden calcular valores de límites superior e inferior si se desea y es requerido.

Anterior al cálculo para cada componente del parámetro  $Q$  y  $F$ , se definen dos parámetros de fallo y reparo incondicional, indicados por:

$w(t)$  = Parámetro incondicional de fallo al tiempo  $t$ . Probabilidad que el componente falle por unidad de tiempo al tiempo  $t$ , dado que salto al estado normal al tiempo cero.

La cantidad  $w(t)dt$  es la probabilidad que el componente falle durante el intervalo  $[t, t+dt)$  dado que el componente estaba como nuevo al tiempo cero. Para un componente no reparable el parámetro incondicional de fallo coincide con la densidad de fallo  $f(t)$ .

Los parámetros  $\lambda(t)$  y  $w(t)$  refieren fallos por unidad de tiempo al tiempo  $t$ . Estas cantidades, empero refieren diferentes poblaciones.  $\lambda(t)$  presupone un comportamiento tan bueno como nuevo al tiempo cero y normal al tiempo  $t$ , en tanto  $w(t)$  asume componentes con un funcionamiento como si fuese nuevo al tiempo cero.

$W(t_1, t_2)$  = **Numero** esperado de fallas en el intervalo  $t_1, t_2$ ; dado que el componente salto al estado normal al tiempo cero. Matemáticamente se define por:

$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} w(t) dt \quad (2.7)$$

El valor de  $W(0, t)$  para un componente no reparable es igual a  $F(t)$  y diverge a infinito conforme  $t$  se hace grande.

$v(t)$  = Parámetro incondicional de reparo al tiempo  $t$ .

Define la probabilidad que el componente sea reparado por unidad de tiempo al tiempo  $t$ , dado que salto al estado normal al tiempo cero.

Las cantidades representadas por  $v(t)$  y  $\mu(t)$  son diferentes, ya que representan diferentes poblaciones.

$V(t_1, t_2)$  = Numero esperado de reparos durante el tiempo  $[t_1, t_2)$ , dado que el componente saltó al estado normal al tiempo cero. Matemáticamente se define:

$$V(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (2.8)$$

Los parámetros incondicionales  $w(t)$  y  $v(t)$ , que fallan durante el intervalo de tiempo  $(t, t+dt)$  son clasificados en dos tipos:

Tipo 1: Un componente que fue reparado durante en intervalo  $[u, u+du)$ , ha estado en funcionamiento normal al tiempo  $t$ , y falla durante  $[t, t+dt)$ , dado que el componente salto al estado normal al tiempo cero. La probabilidad para este tipo de componente:

$$v(u)du \cdot f(t-u)dt \quad (2.9)$$

Donde:

$v(u) du$  = Probabilidad que el componente sea reparado durante  $[u, u+du)$ , dado que es tan bueno como nuevo al tiempo cero.

$F(t-u)dt$  = Probabilidad que la componente ha estado en operación normal al tiempo  $y$  falla en el intervalo  $(t, t+dt]$ , dado que operaba como nuevo al tiempo cero y fue reparado al tiempo  $u$ .

Tipo 2: Un componente cuyo comportamiento ha sido normal hasta el tiempo  $t$  y falla durante el intervalo  $[t, t+dt)$ , dado que salto al estado normal al tiempo cero. La probabilidad para este tipo de componentes es  $f(t)dt$ .

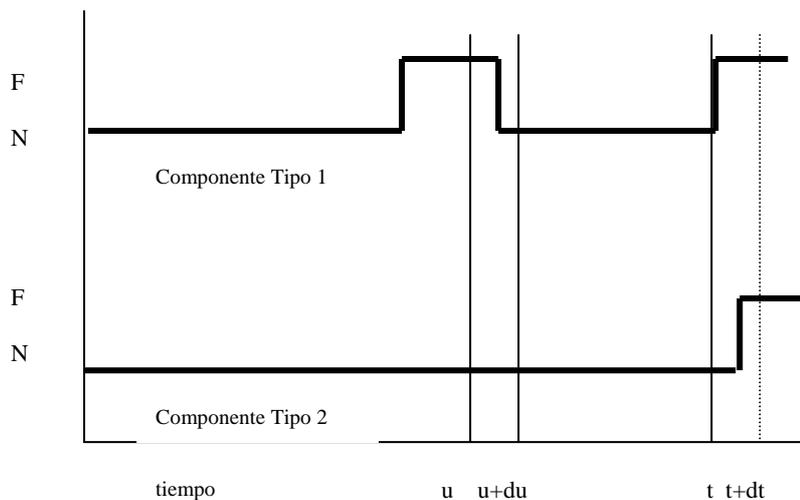


Figura 2.16 Componente que falla durante el intervalo  $[t, t+dt)$   
 Fuente: "Reliability, Engineering And Risk Assessment" Pág 191

Así el parámetro  $w(t)$  es la suma para el primero y segundo tipo de componentes:

$$w(t)dt = f(t)dt + dt \int_0^t f(t-u)v(u)du$$

$$w(t) = f(t) + \int_0^t f(t-u)v(u)du \quad (2.10)$$

Si el componente es no reparable y se asume una tasa de fallo constante:

$$w(t) = f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

de donde para el cálculo de disponibilidad para componentes no reparables:

$$Q(t) = \int_0^t [w(u) - v(u)]du = \int_0^t \lambda e^{-\lambda u} du = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

Para calcular  $W(0,t)$  para componentes no reparables y de acuerdo a la ecuación 2.7, se tiene:

$$W(0,t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda u} du = 1 - e^{-\lambda t} = F(t) = \text{No Disponibilidad.} \quad (2.13)$$

### **2.8.2 Conjuntos de corte**

El siguiente paso en la técnica KITT es calcular los conjuntos de corte para el sistema.

Un conjunto de corte es una colección de eventos básicos que tienen la siguiente característica: si todos los eventos básicos ocurren, el evento tope sucederá.

Los sistemas largos o complejos tienen una enorme cantidad de modos de fallo, resulta por lo tanto necesario reducir el número de modos de fallo para simplificar el análisis.

Los conjuntos de corte cuyo fallo involucran el fallo general del sistema, son denominados conjuntos mínimos de corte.

### **2.8.3 Generación de conjuntos mínimos de corte**

La forma de generar los conjuntos mínimos de corte para un sistema es descomponer las compuertas que lo constituyen, una compuerta OR incrementa el número de conjuntos de corte, en tanto la

compuerta AND incrementa el tamaño de los conjuntos de corte; el algoritmo para generarlos es el siguiente.

1. Alfabetice cada compuerta.
2. Numere cada evento básico.
3. Construya una matriz, y coloque en el primer renglón y columna de la matriz a la compuerta más alta del árbol de fallo.
4. Realice iteraciones de acuerdo a las dos permutaciones básicas. a) o b); las iteraciones se realizan en forma descendente. (Cuando los eventos aparezcan en rectángulos, reemplácelos por compuertas equivalentes o eventos básicos)
  - a) Reemplace una compuerta OR por un arreglo vertical que incluya los miembros de la compuerta de entrada, esto incrementa los conjuntos de corte.
  - b) Reemplace una compuerta AND por el arreglo horizontal que incluya los elementos de dicha compuerta, esta acción incrementa el tamaño de los conjuntos de corte.
5. Cuando todas las compuertas hallan sido reemplazadas por eventos básicos, obtenga los conjuntos mínimos removiendo los súper conjuntos. Un súper conjunto es un conjunto de corte que incluye otros conjuntos de corte.

#### **2.8.4 Parámetros de conjuntos mínimos de corte**

Un conjunto de corte ocurre si todos los eventos básicos en el conjunto de corte ocurren. La probabilidad de ocurrencia de un conjunto de corte al tiempo  $t$ ,  $Q^*(t)$ , se obtiene de la intersección de todos los eventos básicos:

$$Q^*(t) = \Pr(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) = \prod_{j=1}^n Q_j(t) \quad (2.14)$$

Un sistema en paralelo con  $n$ -componentes tiene conjuntos de corte de la forma  $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ . El cálculo de  $Q^*(t)$  no representa problema ya que:

$$Q^*(t) = Q_1(t)Q_2(t)\dots Q_n(t) \quad (2.15)$$

El número esperado de fallos que el conjunto de corte experimenta por unidad de tiempo al tiempo  $t$ ,  $w^*(t)$  se define por:

$$w^*(t) = \sum_{j=1}^n w_j(t) \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^n Q_l(t)$$

(2.16)

La tasa de fallo para cada conjunto de fallo,  $\lambda^*(t)$  se deriva de  $w^*(t)$  y  $Q^*(t)$ :

$$\lambda^*(t) = \frac{w^*(t)}{[1 - Q^*(t)]}$$

(2.17)

El valor de  $W^*(0,t)$ , se define:

$$W^*(0,t) = \int_0^t w^*(u) du$$

(2.18)

## 2.9 Simulación Montecarlo

La forma de validar los resultados obtenidos es observando el comportamiento del sistema en operación, pese a que quizá esta sea la mejor forma de validación no es la mas recomendable, por lo que se sugiere aplicar una técnica de simulación conocida como montecarlo. El capitulo cuatro, presenta un análisis detallado de la simulación Montecarlo; baste decir que esta técnica de simulación es muy poderosa y a menudo se utiliza directamente para calcular la confiabilidad de sistema evitando las técnicas anteriores.

Como en los casos previos, su utilización requiere comprender el principio sobre la que opera la simulación así como la información requerida por la misma.

## 2.10 Resultados

El informe final sobre el estudio de confiabilidad, debe representar más que un reporte con parámetros de probabilidad. Debe incluir puntos críticos de fallo, causas probables de la debilidad del sistema y subsistemas en estudio, recomendaciones de mejora, riesgos potenciales y todo aquello que sea útil para la administración.

El reporte debe ser claro y entendible, el mostrar cantidades grandes de calculo, por lo general resulta contraproducente; la información deberá presentarse en forma resumida, el recurrir a cualquier método grafico que aclare el concepto es valido y bien recibido.

Debe hacerse notar que cualquier esfuerzo adicional en el reporte que contribuya a hacer conciencia de la importancia de los estudios de confiabilidad, debe realizarse sin pretexto alguno. Este punto, además de brindar prestigio al analista o equipo, puede prevenir un evento no deseado el cual puede llegar a ser catastrófico.

### 3. CASO DE ESTUDIO

#### 3.1 Descripción

Los capítulos 3 y 4 tienen como finalidad ejemplificar la metodología empleada, para ello se ha escogido un caso real referente a una planta industrial petroquímica de producción de un plástico llamado poliestireno.

El poliestireno es un polímero; un polímero es una molécula de gran tamaño formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas: algunas tienen ramificaciones, otras más semejan a escaleras de mano y otras son redes tridimensionales.

Existen polímeros naturales de gran valor comercial como el algodón, formado por fibras celulósicas; la seda es otro polímero natural que es muy apreciado; la lana, proteína del pelo de las ovejas, es un ejemplo más.

La mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas que se obtienen a partir de un proceso químico llamado polimerización.

En este proceso, se unen varias moléculas mediante calor, luz o un catalizador; de esta forma, a partir de un compuesto generalmente de carácter no saturado llamado monómero se forma una cadena molecular de múltiples eslabones, elevado peso molecular y de propiedades físicas y químicas muy diferentes de las que poseen las moléculas sencillas; a escala industrial, estos polímeros son llamados plásticos.

La estructura interna de los polímeros determina sus propiedades fundamentales; los plásticos son malos conductores del calor y la electricidad: son aislantes, por lo que su uso está muy extendido en la industria eléctrica y electrónica.

Las propiedades mecánicas de un polímero son: resistencia mecánica y un módulo de elasticidad menor con respecto a los metales, además de dependencia respecto al tiempo y a la temperatura así como gran sensibilidad al impacto; en este último punto existen materiales muy quebradizos como el poliestireno hasta los altamente resistentes como el policarbonato.

La propiedad química de mayor interés en un polímero es ser inerte frente a la mayoría de las sustancias líquidas, sólidas y gaseosas

comunes. Actualmente, sólo el vidrio supera a los plásticos en esta propiedad; el desarrollo de plásticos más complejos ha hecho que esta diferencia sea cada vez menor.

Otras características químicas de un polímero son: peso molecular, tamaño de partícula, grado de entrecruzamiento y grado de conversión; por otro lado, entre las características físicas más relevantes se tienen: resistencia al impacto, índice de fluidez, color, apariencia, así como porcentaje de monómero sin reaccionar.

Comercialmente hablando, las características más importantes de un plástico son las siguientes:

**Resistencia al impacto.** Mide la resistencia mecánica del material a la ruptura. Es una medida del grado de fragilidad del material.

**Índice de fluidez (melt index).** Esta propiedad muestra el comportamiento de un material al fluir dentro de un molde para producir un producto plástico.

**Porcentaje de monómero sin reaccionar.** Durante el proceso, una pequeña cantidad de monómero involucrado queda sin reaccionar; dependiendo de la aplicación que tendrá el polímero producido, cierto porcentaje de monómero es permitido, para aplicaciones como la industria alimenticia el porcentaje está estrictamente regulado.

**Apariencia Física del material.** Este punto incluye factores como el color, contaminación por agentes externos, cambios en el color al someterlo a elevadas temperaturas o tensiones durante el proceso, etc. Una apariencia física inapropiada, provocará el rechazo del material por parte del consumidor.

El poliestireno, es un plástico producido por la polimerización del monómero de estireno (el cuál es un derivado del petróleo). El poliestireno cristal (GPPS) es un plástico que se desarrolló por vez primera en los años 30 en Alemania, este material es transparente, frágil, cristalino y de alto brillo.

Existen tres tipos de poliestireno: Cristal, impacto y expandible.

El poliestireno Cristal es un homopolímero que se obtiene de la polimerización del estireno. Es de estructura amorfa, se considera una de los plásticos de mayor transparencia y brillo superficial, sin embargo, presenta alta rigidez y fragilidad. Es considerado como uno de los plásticos más fácil de procesar.

Las aplicaciones del poliestireno cristal se dirigen a campos donde no se requiera de estabilidad al ser sometidos a la intemperie, ya que la luz ultravioleta causa amarillamiento.

Sus usos más comunes son los estuches para audio, cassetes, envases, vajillas desechables, juguetes, cancelería para interiores y joyería de fantasía.

Debido a la fragilidad del poliestireno cristal, se desarrollan grados con índices más elevados de comportamiento mecánico mediante la copolimerización del estireno con polímeros elastoméricos tales como el polibutadieno.

La copolimerización se efectúa por el método de polimerización al azar; la cantidad de polibutadieno que se utiliza varía entre un 2% hasta el 9%, dependiendo de la cantidad utilizada el material se clasifica en poliestireno medio impacto, el cual es traslúcido, y en poliestireno de alto impacto, que es opaco.

El poliestireno expansible se obtiene al someter al estireno a un proceso que logra espumarlo, esta presentación posee excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico, además de tener muy baja densidad, por lo que es ideal para la construcción de viviendas, edificios, aislante en depósitos frigoríficos, vasos desechables de tipo térmico y empaques para uso agrícola, entre otros. Se distingue como un producto color blanco muy ligero y de estructura celular que puede desmoronarse.

Otros copolímeros importantes que involucran poliestireno, son las mezclas con acrílico-nitrilo y acrílico nitrilo-estireno polibutadieno.

Comercialmente hablando, el poliestireno debe cumplir con ciertos parámetros de calidad, entre otros:

**Monómero residual:** El poliestireno se utiliza a menudo como material de empaque en la industria alimenticia. Para producir un plástico que no sea nocivo a la salud, además de dejar un sabor desagradable se debe retirar el monómero residual (monómero que no reaccionó). El límite máximo permitido es del orden de 0.1% en el producto final.

**Color:** El material a comercializar debe presentar un color blanco, los límites permitidos son hacia una tonalidad ligeramente amarillenta o azul.

**Contaminación:** Esta propiedad es muy importante en la presentación de un producto terminado, por ejemplo, no se desea que un gabinete de televisión que presente manchas oscuras o claras.

Melt Index: cuantifica el grado de fluidez que tendrá un polímero en una máquina de moldear, en la que se dará forma al producto final.

Impacto: Mide la resistencia que presenta el producto al romperse; un material de alto impacto indica que el producto se rompe con dificultad; por otro lado un material con bajo impacto se rompe con facilidad.

El consumo mundial de materias primas plásticas supera actualmente las 210 millones de toneladas anuales. Estados Unidos es el país de mayor consumo con 54.6 millones de toneladas. China ocupa el segundo lugar con 25 millones de toneladas por año, presentando un índice de crecimiento anual del 12%. Alemania se mantiene en el tercer lugar con 16 millones de toneladas seguido muy de cerca por Japón con 15 millones de toneladas anuales. México ocupa la posición 12 a nivel mundial con 4.5 millones de toneladas y es el segundo país en nivel de consumo en Latinoamérica después de Brasil que alcanza las 7 millones de toneladas anuales.

Por otra parte, el comercio internacional de productos plásticos manufacturados se eleva hoy día a 80 mil millones de dólares por año, reflejando un mercado de grandes proporciones y de muchos actores. Sólo Latinoamérica importa hoy 10 mil millones de dólares por año de diversas manufacturas plásticas.

Los principales países exportadores de plástico y sus manufacturas son Estados Unidos, Alemania, Bélgica, Francia, Japón e Italia, con una participación en el mercado mundial del 60%.

El consumo de plásticos en México es de 42 kilos anuales por persona y se reporta una tasa promedio anual de crecimiento de consumo de un 6%, cifra similar a la de la mayoría de los países en Latinoamérica, que exhiben un mercado potencial de 500 millones de consumidores.

El poliestireno (PS) ocupa un lugar importante entre los plásticos de aplicación general y permanece entre los cinco plásticos de mayor consumo volumétrico a nivel mundial, sólo superado por el polietileno, el cloruro de polivinilo (PVC) y el polipropileno.

Este plástico es en la actualidad el más costoso de producir, ya que el precio del monómero de benceno, materia prima para su fabricación, ha permanecido por arriba de \$1 dólar por litro, casi cuatro veces su promedio histórico. El efecto en el PS ha sido muy violento, con incrementos en su precio del orden del 76%. A pesar de ello, el consumo de PS en México continúa presentando un incremento del 2% anual, siendo el mercado de la refrigeración, los televisores y el de los envases para alimentos sus principales consumidores,

sumándose el mercado del PS expandible atractivo en la industria de la construcción.

Se pronostica que los copolímeros de estireno presentarán en el futuro un crecimiento del 12% en el consumo; este crecimiento se verá impulsado por la industria de la construcción en aplicaciones como tuberías y marcos para ventanas.

### **3.2 Uso de la metodología**

En los siguientes incisos se ejemplifica la metodología propuesta para el análisis de confiabilidad, para el caso de estudio.

### **3.3 Funcionamiento del sistema.**

En la planta química de producción de poliestireno, el producto principal es el HIPS, poliestireno de alto impacto, para lo cual se somete a un proceso de polimerización a una mezcla de monómero de estireno y de estireno- butadieno.

La producción del plástico se realiza de forma ininterrumpida en tres plantas químicas, que en su conjunto producen 150, 000 toneladas al año, con destino principalmente al mercado nacional y en menor medida a norte, centro y Sudamérica.

La planta cuyo sistema se estudia en el presente trabajo, tiene una capacidad de producción de 5000 kg/hr; lo que brinda una producción anual aproximada de 43 800 toneladas.

Los precios del producto terminado de primera calidad varían de acuerdo al tipo de material producido así como con la demanda; en el 2006 fluctuaron entre los \$7 pesos/kg hasta los \$14 pesos/kilogramo, por lo que anualmente se espera un ingreso por ventas que va desde \$306.60 millones de pesos, hasta los \$613.20 millones de pesos; por cada hora de producción de producto dentro de especificación (d/e) se esperan ingresos que van desde los \$35 hasta los \$70 mil pesos.

Si el producto terminado se clasifica como fuera de especificación (f/e), el precio puede caer en el mejor de los casos hasta la mitad del valor antes mencionado, con lo que no se cubren ni siquiera los costos fijos. Un evento indeseable como un paro de planta costaría como mínimo tres días de pérdida de producción, en cifras significa 360 toneladas de material, y una pérdida de ingreso fluctuante desde \$2,520,000 pesos; hasta los \$35,280,000.

Los datos anteriores muestran la preocupación de la administración para tomar acciones que tiendan a reducir al mínimo la producción de material fuera de especificación así como el evitar paros de planta no

programados, que dañan la imagen y el prestigio de la empresa, además de afectar seriamente sus finanzas.

Este trabajo tiene como finalidad analizar y evaluar dos eventos indeseables: el producir un material fuera de especificación (f/e) y la ocurrencia de un paro de planta ocasionado por el fallo en los equipos de operación.

### **3.4 Descripción del proceso**

El proceso de producción de poliestireno se realiza de manera ininterrumpida y es el siguiente:

A través de bombas de alimentación, corrientes de solución de hule monómero de estireno (sm) y reciclo llegan a un mezclador en línea con el objeto de obtener una mezcla homogénea que alimentará la primera etapa del proceso: el reactor primario (R-1).

La mezcla de materiales alimentada al R-1, pasa previamente por un sistema de filtros donde se retiene hule no disuelto e impurezas de diversa índole, además la mezcla pasa por precalentador, que es un intercambiador de tubo y coraza, con el fin de elevar la temperatura de la mezcla a un rango de entre los 50-60 °C.

Además de la mezcla de corrientes mencionadas, se alimenta al R-1 iniciador que provoca una reacción altamente exotérmica, el exceso de calor de la reacción es disipado mediante un sistema de enfriamiento que utiliza agua y un agitador vertical tipo ancla. En la primera parte del proceso, se obtiene melaza de polímero con 20% de conversión a partir de una mezcla líquida alimentada. La melaza es enviada con ayuda de una bomba de transferencia hacia el reactor 2 (R-2); donde se incrementa el grado de conversión al 70% y se adicionan diferentes aditivos.

El R-2 es un tanque horizontal agitado con siete etapas, a presión constante y enchaquetado, con capacidad de trabajo para 4600 lts (el 50% de su volumen total).

El reactor cuenta con un agitador tipo paletas, el agitador tiene siete etapas, separadas una pulgada del cuerpo del reactor. Del R-2 el producto se envía a un tercer reactor y al área de extracción de monómero sin reaccionar.

El tercer reactor (R-3) es un tanque vertical, cuyo objetivo principal es el de continuar con el proceso de polimerización hasta un 95% en sólidos. El material es enviado hacia el área de extracción de monómero, en el que se eleva la temperatura de la melaza a fin facilitar la separación del monómero de estireno sin reaccionar.

El área de extracción de estireno, es un tanque enchaquetado de forma cónica, que se calienta a temperaturas que alcanzan los 280 °C. Cuenta además con un sistema de vacío que realiza la extracción de monómero. El material finalmente es extruido, enfriado, cortado y empacado para su venta final.

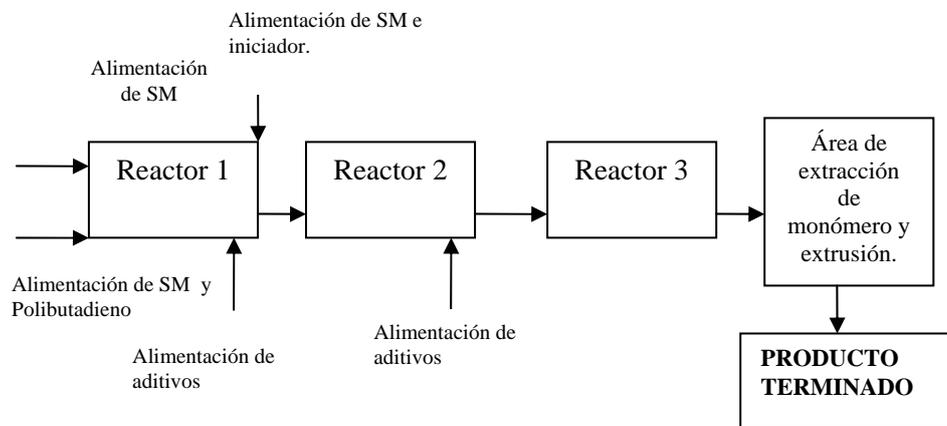


Figura 3.1 Descripción del proceso de polimerización.

Fuente: Autor

Para este ejemplo en particular, se realizará el estudio de confiabilidad para la primera parte del proceso, el reactor 1 esta parte del proceso envuelve las siguientes acciones:

- ❖ Durante la primera parte de la reacción, en el reactor 1, se forma el peso molecular del polímero, el cual determina el índice de fluidez. También se forma el tamaño y forma de la partícula íntimamente ligado a las propiedades mecánicas y apariencia física (brillo) del producto terminado.
- ❖ El agitador del reactor se realiza la mezcla adecuada de las sustancias involucradas durante la reacción, si esto no se llevara a cabo, el producto terminado se separaría en dos fases, resultando un producto fuera de especificación

- ❖ El iniciador adicionado brinda una velocidad de reacción adecuada para la productividad del proceso, además contribuye a la formación del tamaño de cadena del polímero.
- ❖ En esta parte del proceso, la reacción es altamente exotérmica, por lo cuenta con un sistema de remoción de calor, esta es la única parte del proceso en el cuál se retira calor; si esto no se realiza en forma adecuada, se produce un efecto run-away o disparo incontrolado de la reacción.
- ❖ Un fallo en este sistema lleva a un paro de planta.

El reactor 1 (R-1) es uno del tipo CSTR (reactor continuo de tanque agitado), cuenta con una capacidad máxima de trabajo de 11,500 lts. El llenado depende de la capacidad de producción de la planta y el producto que se produzca. El agitador es del tipo de ancla y cuenta con un motor de 100 hps.

### **3.3 Consulta a expertos**

El grupo interdisciplinario consultado, incluye a expertos del área de producción, mantenimiento mecánico, mantenimiento eléctrico y personal operativo. Este grupo de expertos identificó diversos subsistemas que conforman el sistema en estudio; así mismo se definieron dos eventos indeseables para el estudio de confiabilidad enfocado a calidad del producto terminado: Calidad fuera de especificación (F/E) y paro de planta o pérdida de operaciones.

Los sistemas y componentes involucrados así como los diagramas de ingeniería, se muestran en el apéndice I.

#### **3.5.1 Descripción de sistemas**

##### *1. Sistema de enfriamiento.*

Descripción: Agua de torre a una temperatura que oscila entre los 10 a 25 °C, se alimenta a la chaqueta del reactor con ayuda de una bomba de alimentación con el fin de reducir el calor generado por la reacción; el agua sale del proceso a una temperatura que oscila entre los 50 y 60 °C con destino a la torre de enfriamiento para ser enfriada y posteriormente alimentada de nuevo al proceso. El flujo de agua es controlado por un sistema de diferencial de temperaturas colocado a la entrada y salida del reactor, el que a su vez, controla la apertura de una válvula neumática regulando la cantidad y temperatura de agua que entra al proceso. El sistema se muestra en la figura 1 y la descripción de los componentes en la tabla 1, ambos del apéndice I.

##### *2. Sistema de alimentación.*

Descripción. Tres corrientes: SM fresco, SM reciclado y SM-Hule son alimentadas a través de bombas al Reactor; el flujo de las corrientes es regulado vía actuadores y válvulas neumáticas, que reciben la señal desde una sumadora de señales ubicada en el tablero de control. Las corrientes pasan por un tren de filtros y un precalentador para posteriormente ser alimentadas al Reactor 1. El flujo de alimentación debe ser en forma ininterrumpida y en la proporción adecuada.

El sistema se muestra en la figura 1 y los elementos en la tabla 2, apéndice I.

### *3. Sistema de precalentador.*

Descripción. En esta parte del proceso, la corriente salida de los filtros se eleva una temperatura con rangos que van desde los 35° hasta los 60° C. El precalentador es un intercambiador de tubo y coraza; por la parte de los tubos fluye la mezcla a calentar y por la parte de la coraza fluye vapor de agua de 10 lbs. de presión. Dado que la temperatura a la que ingresa la corriente de alimentación al reactor facilita la reacción, una desviación en la temperatura de entrada obligaría a realizar modificaciones en otras áreas de la planta, afectando la morfología del producto terminado. El diagrama y elementos del sistema se muestran en el apéndice 1, figuras 3 y tabla 3.

### *4. Sistema de iniciador.*

Descripción. Este sistema se encarga de suministrar una mezcla de SM-iniciador al reactor con el fin de acelerar el proceso de polimerización. La cantidad a suministrar de mezcla SM-iniciador es muy importante para el adecuado desarrollo de la reacción; una cantidad insuficiente provocaría que la reacción no se llevara a cabo; una cantidad excesiva provoca una reacción exotérmica incontrolable (Run-away). El diagrama se muestra en la figura 4 y los componentes en la tabla 4, del apéndice I.

### *5. Sistema de control de peso.*

Descripción. El llenado en el reactor se controla mediante una bomba para materiales viscosos, la cuál envía polímero con un grado de conversión de aproximadamente un 30% hacia la siguiente etapa del proceso. Resulta importante mantener determinado llenado en el reactor ya que este brinda un determinado tiempo de residencia dentro del reactor al material, en el cual se definen las características morfológicas del producto final. Aunado a esto, un peso elevado aumenta el grado exotérmico de la reacción, por otro lado, poco peso dificulta el desarrollo de la misma.

Dado la viscosidad del material a ser manipulado, la bomba, así como la tubería por la cuál se transporta el material utiliza una corriente de aceite térmico el cuál alcanza una temperatura de 180 °C, esto es con la finalidad de mantener una viscosidad relativamente baja en el material, si el flujo de aceite térmico decae, el material es imposible de mover. El diagrama así como los componentes que conforman este sistema aparecen en la figura y tabla 5, del apéndice I.

### *6. Sistema de agitación.*

Descripción. El agitador del reactor uno, pertenece al tipo de ancla; su función es el de mezclar el material dentro del reactor con la corriente de alimentación y el iniciador, asegurando un buen desarrollo de las propiedades mecánicas del producto. Las componentes importantes son un sensor de revoluciones por minuto (RPM's), esta componente mide el número de giros por minuto que el agitador da entorno a su eje, el agitador es movido un motor que actúa de acuerdo a una señal de frecuencia predeterminada por el sistema de control. Este sistema así como sus componentes se muestran en la figura y tabla 6 del apéndice I.

El Reactor 1 junto con todos los subsistemas que lo conforman son del tipo de sistema con misión orientada, por lo que debe cumplir con los siguientes puntos:

El reactor debe operar en forma continua (ininterrumpida) durante un tiempo determinado (tiempo de misión).

No se permiten la interrupción del proceso ni siquiera en breves períodos de tiempo.

Cuando el sistema ha cumplido su misión, cada una de las componentes involucradas es revisada y reparada, de tal forma que todas se comportan como nuevas.

El sistema debe cumplir el tiempo de misión sin ningún fallo.

### **3.6 Construcción del árbol de fallo**

El árbol de fallo permite identificar relaciones causales de las fallas de un sistema. En este caso se ha definido estudiar dos tipos de eventos tope no deseados: producir material fuera de especificación (material f/e) y la pérdida total de operaciones, llamado paro de planta.

Las ventajas de representar un sistema en estudio en forma de árbol de fallo son las siguientes:

Permite centrar el análisis en los elementos y eventos que llevan a un evento tope en particular.

Presenta un apoyo visual al análisis de confiabilidad.

Identifica puntos críticos de fallo del sistema.

Permite entender a profundidad el comportamiento del sistema.

Representa un reporte de ingeniería.

El árbol de fallo que representa el evento tope del sistema en estudio, no necesariamente debe incluir a todos los subsistemas; para este caso de estudio en particular, el árbol de fallo para el evento tope “material fuera de especificación (f/e)” no incluye a un subsistema, en tanto que el árbol de fallo que representa el evento tope “paro de planta” abarca todos.

Los árboles de fallo que representan a los eventos tope definidos, se muestran en las siguientes figuras:

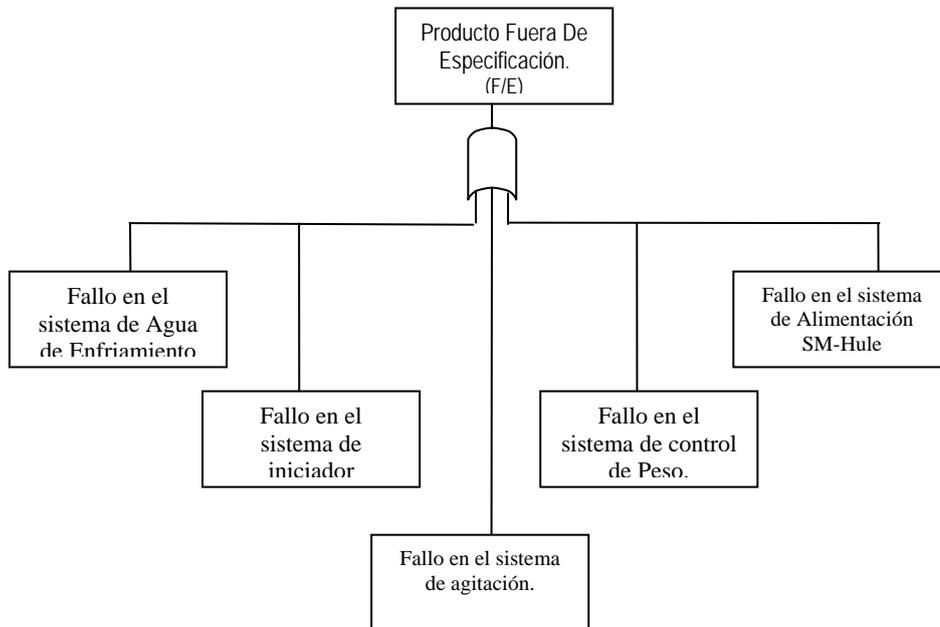


Figura 3.2 Árbol de fallo para el evento tope “Producto fuera de especificación”

Fuente: Autor.

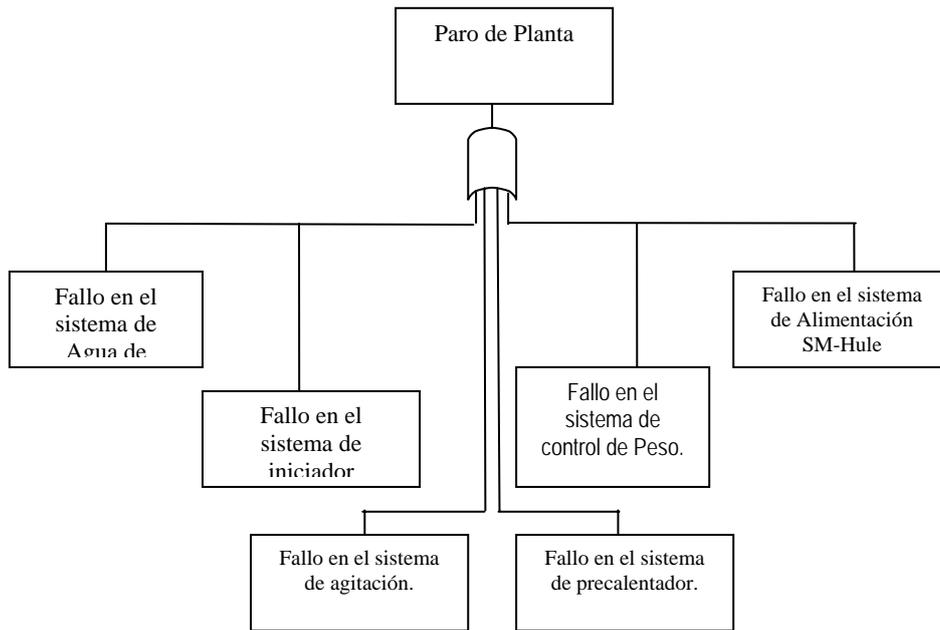


Figura 3.3 Árbol de fallo para el evento tope "Paro de planta"  
Fuente: Autor.

El siguiente paso es el descomponer los subsistemas constituyentes y realizar el árbol de fallo para cada uno de ellos hasta llegar al punto de representar los eventos tope, este paso puede ser eliminado construyendo un árbol de fallo para un evento tope determinado y descomponerlo hasta los eventos básicos que lleven su ocurrencia, empero complicaría enormemente el árbol y por ende el estudio.

Los árboles de fallo que representan a cada uno de los subsistemas involucrados en los dos casos a analizar, se muestran en el apéndice II.

### 3.7 Recolección de datos

Los datos usados para realizar los cálculos de confiabilidad para este caso de estudio han sido recabados de diversos bancos y fuentes de datos.

Los datos corresponden a los valores de tasas de fallo  $\lambda$  y han sido convertidos a valores estándar de fallos/día y fallos/años, ya que los horizontes que se tienen planeado analizar abarcan esos períodos.

Los bancos y fuentes de datos consultados son los siguientes:

United Kingdom Atomic Energy Establishment  
WASH 1400  
Instrumental Maintenance at Large Plants.

Los valores recopilados, la fuente de donde se obtuvieron y las conversiones se muestran en el apéndice III.

### 3.8 Cálculo de disponibilidad del sistema

El horizonte para realizar el cálculo de disponibilidad se proyectan a un año, si los valores obtenidos de son altos significa que el sistema es confiable para ese período de tiempo y se puede ampliar el horizonte a un tiempo menor; por otro lado, si los valores de disponibilidad son bajos, se reduce el horizonte de tiempo para el cuál se realizará el estudio.

En lo siguiente, se muestra el cálculo de disponibilidad para el sistema de enfriamiento, con evento tope “producción fuera de especificación”; los cálculos para los demás subsistemas aparecen en el apéndice IV. Al final de este inciso, se muestra una tabla que recopila los resultados obtenidos.

Con el fin de facilitar el seguimiento de los cálculos, se muestra el árbol de fallo así como los datos para el sistema de enfriamiento.

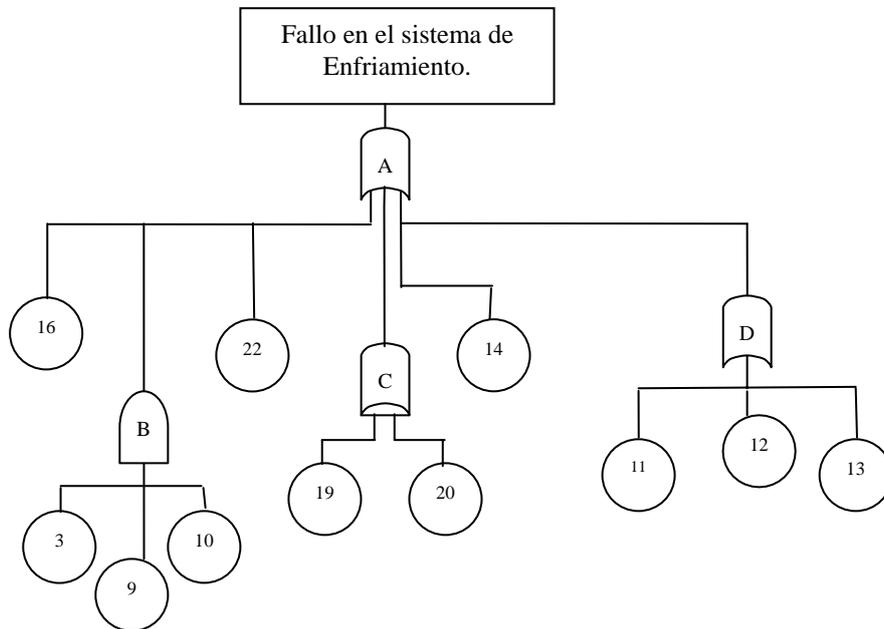


Figura 3.4. Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.  
 Evento tope “Producto fuera de especificación (F/E)”.  
 Fuente: Autor.

Componente	Tasa de fallo Fallos/año	Componente	Tasa de Fallo Fallos/año
3	0.0365	14	0.0026
9	0.0365	16	0.0210
10	0.0365	19	0.0095
11	0.0260	20	0.3650
12	0.0260	22	0.1398
13	0.0365		

Tabla 3.1. Tasa de fallo para el árbol de fallo del sistema de enfriamiento.  
Evento tope "Producto fuera de especificación".

El cálculo consiste en analizar la probabilidad de ocurrencia de cada una de las compuertas, hasta llegar a la compuerta "A" que representa el evento tope. El análisis inicia con la compuerta "B" que es de tipo AND:

$$Q(B) = Pr(B) = Pr(3) \cap Pr(9) \cap Pr(10)$$

$$Pr(B) = (0.036500) \cdot (0.036500) \cdot (0.036500)$$

$$Pr(B) = 0.000048$$

La compuerta "C" es de tipo OR:

$$Q(C) = Pr(C) = Pr(19) + Pr(20) - Pr(19) Pr(20)$$

$$Pr(C) = 0.009453 + 0.365000 - (0.009453) \cdot (0.365000)$$

$$Pr(C) = 0.371002$$

La compuerta "D" también es del tipo OR:

$$Q(D) = Pr(D) = Pr(11) + Pr(12) + Pr(13) - Pr(11) \cdot Pr(12) - Pr(12) Pr(13)$$

$$- Pr(11) Pr(13) + Pr(11) Pr(12) Pr(13)$$

$$Pr(D) = 0.025988 + 0.025988 + 0.036500 - (0.025988) \cdot (0.025988)$$

$$- (0.025988) \cdot (0.036500) - (0.036500)(0.025988) +$$

$$+ (0.025988) \cdot (0.025988) \cdot (0.025988)$$

$$Pr(D) = 0.085928$$

El cálculo restante, es el de la compuerta "A", dado que esta es una compuerta tipo "OR", la no disponibilidad de este sistema se puede calcular como una compuerta "OR", sin embargo, es más sencillo trabajar con los complementos; así:

$$Q(A) = 1 - [\Pr(\bar{I6}) \cap \Pr(\bar{B}) \cap \Pr(\bar{22}) \cap \Pr(\bar{I4}) \cap \Pr(\bar{C}) \Pr(\bar{D})]$$

$$Q(A) = 1 - [(0.978976) \cdot (0.999952) \cdot (0.860205) \cdot (0.997372) \cdot (0.628998) \cdot (0.914072)]$$

$$Q(A) = 0.517119$$

De allí, la disponibilidad para el sistema de enfriamiento es:

$$A(S) = 1 - Q(S)$$

$$= 1 - 0.517119$$

$$= 0.482881$$

En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos. Los valores son probabilidad de ocurrencia por año.

Sistema	Evento Tope: Producto Fuera de Especificación		Evento Tope: Paro de Planta	
	Disponibilidad A(S)	No Disponibilidad Q(S)	Disponibilidad A(S)	No Disponibilidad Q(S)
Enfriamiento	0.482881	0.517119	0.96533	0.034669
Alimentación	0.335417	0.664582	0.716153	0.283846
Iniciador	0.453116	0.546883	0.819174	0.180826
Peso	0.686614	0.313386	0.526923	0.473077
Agitación	0.632798	0.367202	0.944742	0.055258
Precalentador	N/A	N/A	0.973777	0.026222
En Conjunto	0.031887	0.968112	0.274523	0.725476

Tabla 3.2. Valores de disponibilidad y no disponibilidad para los eventos tope en estudio. (los valores indican probabilidad de ocurrencia en un año).

### 3.9 Cálculo de confiabilidad del sistema

El cálculo de confiabilidad se realiza utilizando la técnica KITT explicada en el capítulo 2, esto implica el obtener los conjuntos de corte y realizar los cálculos. Los conjuntos de corte se muestran en el apéndice V y las tablas de estos conjuntos para cada subsistema y evento tope en el apéndice VI. Un resumen de los resultados obtenidos se muestra en las siguientes tablas:

Sistema	Evento Tope Paro de Planta			
	Enfriamiento		Iniciador	
	Confiabilidad R(t)	No Confiabilidad F(t)	Confiabilidad R(t)	No Confiabilidad F(t)
20	0.9971	0.0029	0.9918	0.0082
100	0.9856	0.0144	0.9575	0.0425
365	0.9454	0.0546	0.835	0.165
500	0.924	0.076	0.7714	0.2286
1100	0.8219	0.1781	0.5148	0.4852
2000	0.6604	0.3396	0.2559	0.7441

Evento Tope Paro de Planta				
Sistema	Agitación		Control de Peso	
Tiempo (días)	Confiabilidad R(t)	No ConfiabilidadF(t)	Confiabilidad R(t)	No ConfiabilidadF(t)
20	0.9975	0.0025	0.9705	0.0295
100	0.9871	0.0129	0.8603	0.1397
365	0.9472	0.0528	0.5739	0.4261
500	0.9246	0.0754	0.4655	0.5345
1100	0.8157	0.1843	0.1802	0.8198
2000	0.6563	0.3437	0.0416	0.9584

Evento Tope Paro de Planta				
Sistema	Alimentación		Precalentador	
Tiempo (días)	Confiabilidad R(t)	No ConfiabilidadF(t)	Confiabilidad R(t)	No ConfiabilidadF(t)
20	0.9798	0.0202	0.9986	0.0014
100	0.9029	0.0971	0.9929	0.0071
365	0.6885	0.3115	0.9742	0.0258
500	0.5995	0.4005	0.9645	0.0355
1100	0.3234	0.6766	0.9131	0.0869
2000	0.1274	0.8726	0.792	0.208

Tabla 3.3 Valores de confiabilidad para los sistemas en estudio, con evento tope "Paro de planta".

Evento Tope Paro de Planta		
Sistema		
t	F(t)	R(t)
20	0.0633	0.9367
100	0.2815	0.7185
365	0.7121	0.2879
500	0.8226	0.1774
1100	0.9816	0.0184
2000	0.9995	0.0005

Tabla 3.4 Valores de confiabilidad para el sistema con evento tope "Paro de planta".

EVENTO TOPE PRODUCTO F/E						
SISTEMA	ENFRIAMIENTO		INICIADOR		AGITACIÓN	
Tiempo (Días)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)
20	0.9663	0.0337	0.9586	0.0414	0.9782	0.0218
100	0.8423	0.1577	0.8095	0.1905	0.8956	0.1044
365	0.5345	0.4655	0.4624	0.5376	0.6686	0.3314
500	0.4239	0.5761	0.3476	0.6524	0.5761	0.4239
1100	0.1512	0.8488	0.0978	0.9022	0.2972	0.7028
2000	0.0321	0.9679	0.0146	0.9854	0.1101	0.8899

EVENTO TOPE PRODUCTO F/E				
SISTEMA	CONTROL DE PESO		ALIMENTACIÓN	
Tiempo (días)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)
20	0.982	0.018	0.9511	0.0489
100	0.9132	0.0868	0.7783	0.2217
365	0.7179	0.2821	0.4006	0.5994
500	0.6351	0.3649	0.2856	0.7144
1100	0.3683	0.6317	0.0635	0.9365
2000	0.1627	0.8373	0.0066	0.9934

Tabla 3.5 Valores de confiabilidad para los sistemas en estudio con evento tope "Producto fuera de especificación (F/E)".

EVENTO TOPE PRODUCTO F/E		
SISTEMA		
Tiempo (Días)	R(t)	F(t)
20	0.8463	0.1537
100	0.434	0.566
365	0.0475	0.9525
500	0.0154	0.9846
1100	0.0001	0.9999
2000	0	1

Tabla 3.6 Valores de Confiabilidad Para el sistema con evento tope Producto Fuera de Especificación (F/E).

Los siguientes pasos en la metodología: la simulación así como los resultados finales se presentan en el capítulo 4.

## 4. Simulación Montecarlo

### 4.1 El método Montecarlo

El método Montecarlo fue desarrollado en los años de 40s para estudiar la difusión de neutrones, fenómeno que se comporta de manera aleatoria, y que culminaría en el desarrollo de la bomba atómica.

Los científicos de los laboratorios nacionales de los Álamos, Stanislaw Ulam y Jhon von Neumann inventaron el método llamado Montecarlo, que se emplea en la actualidad en la construcción de modelos de probabilidad: se trata de encontrar soluciones aproximadas usando números aleatorios. De ahí el nombre que se dio a este método, recordando el famoso casino del Principado de Mónaco.

El siguiente ejemplo explica el método: supóngase que se desea calcular el área  $S$  de la figura que está encerrada en un cuadrado de lado 10 unidades:

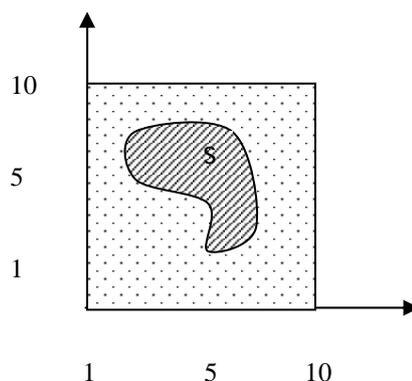


Figura 4.1 Ejemplo de método Montecarlo

Se toma en el cuadrado  $N$  puntos aleatorios. Por ejemplo, con una ruleta que tenga marcados los números del 1 al 10, se determinan pares ordenados de números y se hace corresponder un punto de la figura de cada par

Algunos puntos caerán en  $S$ , otros fuera de  $S$ . Si  $N'$  es el número de puntos que caen en  $S$ , el área aproximada será:  $S \approx \frac{N'}{N}$ . Cuanto más grande sea  $N$ , mejor será la aproximación obtenida.

Este método se utiliza para resolver experimentalmente problemas de probabilidades (tiempo de espera, colas). También se puede usar para resolver problemas que no tienen nada que ver con el azar, como en el ejemplo anterior o para calcular el “volumen” de un cuerpo multidimensional en un espacio multidimensional.

## **4.2 La simulación Montecarlo**

La simulación Montecarlo es una técnica excepcional por su versatilidad. Se puede usar, con diferentes grados de dificultad, para investigar virtualmente cualquier tipo de sistema estocástico, en el caso de confiabilidad de sistemas se requiere de dos elementos: números aleatorios y generar observaciones aleatorias de tiempo de fallo a partir de una distribución de probabilidad.

Un número aleatorio, puede generarse mediante un dispositivo físico como un disco que de vueltas o un aleatorizador electrónico. De esta manera se han generado varias tablas de números aleatorios, entre las que se cuenta una que contiene un millón de dígitos aleatorios, publicada por Rand Corporation.

Los dispositivos físicos se han sustituido ahora por la computadora como la fuente primaria de generadores de números aleatorios, el procedimiento usado por una computadora para obtener números aleatorios se llama generador de números aleatorios.

Un generador de números aleatorios es un algoritmo que produce secuencias de números que siguen una distribución de probabilidad específica y tienen la apariencia de aleatoriedad.

Decir secuencias de números aleatorios, significa que el algoritmo produce muchos números aleatorios en serie. Aunque un usuario puede requerir sólo unos cuantos, en general el algoritmo debe ser capaz de producir muchos. La distribución de probabilidad implica que se puede asociar una afirmación probabilística con la ocurrencia de cada número producido por el algoritmo.

El término número aleatorio se reservará para hablar de una observación aleatoria a partir de alguna distribución uniforme, de manera que todos los números posibles son igualmente probables. Cuando el interés se centra en alguna otra distribución de probabilidad, se hablará de observaciones aleatorias a partir de esa distribución.

En sentido estricto, los números generados por una computadora no se deben llamar números aleatorios por que son predecibles y se pueden reproducir, dado el número aleatorio generador que se use, por lo que se les llama números seudo aleatorios. El punto importante

es que, en forma satisfactoria, hacen las veces de números aleatorios en la simulación si el método que se usa para generarlos es válido.

Se han propuesto varios procedimientos estadísticos bastante elaborados para probar una sucesión de números generada tiene una apariencia de aleatoriedad aceptable. En esencia, los requisitos son que cada número sucesivo tenga una probabilidad igual de tomar cualquiera de los valores posibles y que sean estadísticamente independientes de los otros números en la sucesión.

Una sucesión de observaciones aleatorias que sigan una distribución de probabilidad dada a partir de números aleatorios, puede generarse por medio del método de la transformación inversa.

Sea  $X$  la variable aleatoria involucrada y sea la función de distribución acumulada:

$$F(x) = P\{X \leq x\}$$

4.1

La generación de cada observación requiere los siguientes dos pasos:

1. Genere un número aleatorio uniforme ( $r$ ) entre 0 y 1.
2. Establezca  $F(x) = r$  y despeje  $x$ , que es entonces la observación aleatoria deseada que sigue la distribución de probabilidad dada.

Para ciertas distribuciones continuas, se puede usar el método de transformación inversa en la computadora si primero se despeja  $x$  analíticamente de la ecuación  $F(x) = r$ ; para el caso de la distribución exponencial:

La función de distribución acumulada para la distribución exponencial está dada por

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x \geq 0$$

4.2

Donde  $1/\lambda$  es la media de la distribución. Si se iguala  $F(x)$  al número aleatorio uniforme  $r$ ,  $F(x) = r$ ; se obtiene

$$1 - e^{-\lambda x} = r$$

4.3

De manera que:

$$e^{-\lambda x} = 1 - r$$

4.4

Si se toma el logaritmo natural de ambos lados y se despeja x:

$$\ln e^{-\lambda x} = \ln(1 - r),$$

$$-\lambda x = \ln(1 - r),$$

$$x = -\frac{\ln(1 - r)}{\lambda}$$

4.5

Donde x es la observación que se buscaba a partir de la distribución exponencial, en confiabilidad, x es un tiempo de fallo aleatorio.

Esta aplicación directa del método de transformación inversa proporciona la forma más sencilla de generar observaciones aleatorias sencillas a partir de una distribución exponencial.

Dado que 1-r es en sí mismo un número aleatorio uniforme, es común en la práctica evitar la resta y usar el número aleatorio uniforme original y en lugar de 1-r.

Excel contiene un generador de números pseudo aleatorios que ha sido ampliamente probado. Los números son generados usando la función de Excel RAND (). Cuando esta función es capturada en una celda de una hoja de cálculo de Excel, genera un número pseudo aleatorio uniformemente distribuido con valor entre 0 y 1.

Para diferentes distribuciones, la expresión capturada en Excel para diferentes distribuciones, se muestra en la siguiente tabla:

Distribución	PDF o f(t)	Expresión en Excel Para tiempo de fallo
Exponencial	$\exp(-\lambda t)$	$-\ln[\text{RAND}()]/\lambda$ $\lambda = \text{Tasa de Fallo}$
Weibull	$\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\}$	$\alpha\{-LN(1 - \text{RAND}())\}^{1/\beta}$ $\alpha = \text{parametro de escala}$ $\beta = \text{parametro de forma}$

Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right\}$	<i>NORMINV</i> ( <i>RAND</i> ()), $\mu, \sigma$ $\mu = \text{MEDIA}, \sigma = \text{varianza}$
Uniforme	1/T	T * <i>RAND</i> () T= Tiempo Máximo.
Log normal	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right\}$	<i>LOGINV</i> ( <i>RAND</i> ()), $\mu, \sigma$ $\mu = \text{media}, \sigma = \text{varianza}$

Tabla 4.1 Tiempos de fallo para varias distribuciones.

Para este trabajo, se usa la hoja de cálculo de Microsoft Excel ® que brinda una forma fácil de realizar un estudio de confiabilidad además de brindar excelentes resultados.

#### 4.3 Simulación Montecarlo en una hoja de cálculo.

Para aplicar la simulación Montecarlo en una hoja de cálculo, se utiliza el árbol de fallo construido para un sistema en particular.

Las unidades o módulos son colocados en serie si la falla de uno resulta en la falla del sistema. Por otro lado, si la falla del sistema ocurre cuando todos los componentes fallan, se presenta un sistema en paralelo; si el fallo en el sistema ocurre cuando el número de componentes que fallan exceden un número “m” de un total de “n”, el sistema también se representa en paralelo.

Frecuentemente, un sistema es compuesto por combinaciones de elementos serie y paralelo. Bajo tales circunstancias la fórmula para derivar el comportamiento de la confiabilidad del sistema puede complicarse terriblemente o ser imposible de derivar; para evitar que esto ocurra la recomendación es dividir los subsistemas.

La lógica necesaria para trasladar un árbol de fallo a una hoja de Excel es la siguiente: considere un sistema en serie con dos módulos A y B, la falla de cualquiera de ellos resulta en la falla del sistema. Se da el valor de la tasa de fallo  $T_A$  y  $T_B$  de el modulo A y modulo B en la celda 1 y Celda 2 (de un renglón) respectivamente. La celda 3 contiene el tiempo de misión  $T_M$ . La misión es exitosa si la siguiente expresión resulta “1” (debe recordarse que en este caso, el término “exitoso” significa el fallo del sistema, subsistema o elemento):

$$= \text{IF}(\text{AND}(T_A < T_M, T_B < T_M), 1, 0) \tag{4.6}$$

La expresión anterior es capturada en la celda 4. Esta expresión brinda el valor de “1” si los tiempos de fallo para ambos módulos son menores que el tiempo de misión  $T_M$ . Si cualquiera de los valores de tiempo de fallo es mayor a  $T_M$ , el valor “0” aparece en la celda 4. Renglones adicionales a estas columnas representan simulaciones Montecarlo adicionales.

Lo anterior se ejemplifica en la tabla de ejemplo siguiente:

	C1	C2	C3	C4
$\lambda$	$7.4 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-5}$		
Componente Tiempo a fallar	Módulo A	Módulo B	Tiempo de Misión $T_0$	Resultado Aciertos/ Fallos
Corrida 1	90	103	100	1
Corrida 2	120	102	100	0

Tabla 4.2 Ejemplo de simulación montecarlo con hoja de cálculo  
Para compuerta AND.

La no confiabilidad se estima generando un número elevado de simulaciones llamadas “N” con las condiciones indicadas, después se separan los valores “1” en la columna de resultados, se suman y el resultado se divide entre el número total de simulaciones “N”.

Para un sistema en paralelo, por lo menos alguno de los módulos debe fallar al tiempo de misión  $T_M$ . La celda que contiene el resultado muestra la expresión:

$$= IF(OR(T_A < T_M, T_B < T_M), 1, 0) \quad (4.7)$$

De nueva cuenta, todos los “aciertos” son divididos entre el total de corridas, dando con ello el valor de la no confiabilidad.

Para un sistema del tipo “M” de “N” salidas, se añaden columnas adicionales para representar los N componentes. Se capturan expresiones para tiempos de fallo para cada uno de los “N” componentes y después se examina el número de celdas que contienen un tiempo de fallo inferior a  $T_M$ . Si este número es menor que “M”, se obtiene un “éxito”, fallo del sistema; por el contrario si es mayor a “M”, implica un que el sistema funciona correctamente. De esta forma, la expresión a ser capturada en la celda que contiene la expresión toma la siguiente forma:

$$= IF((IF((T_A < T_M), 1, 0) + IF((T_B < T_M), 1, 0) + \dots + IF((T_N < T_M), 1, 0)) <= M), 1, 0) \quad (4.8)$$

Donde  $T_A, T_B, \dots, T_N$  son los tiempos de fallo de los módulos A, B & N respectivamente.

Para ejemplificar lo anterior, se muestra la lógica a seguir para el árbol de fallo del sistema de precalentador:

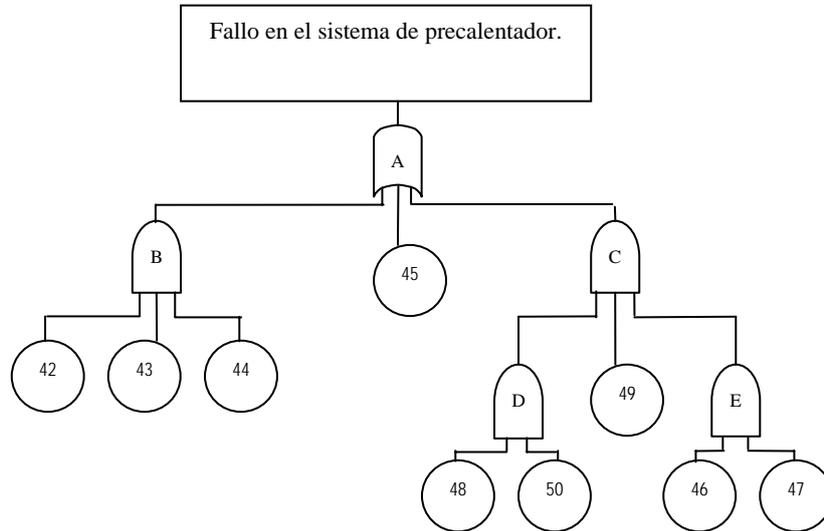


Figura 4.2 Árbol de fallo para el sistema de precalentador.  
Evento tope "Paro de planta".  
Fuente: Autor.

El subsistema se divide por compuertas de manera que la expresión generada no sea tan complicada.

El primer paso es, vía los valores de las tasa de fallo, generar los tiempos de fallo para las simulaciones, por ejemplo para la compuerta "B", la hoja de Excel tendría el siguiente aspecto:

Tasa de Fallo (l)	Valor 1	Valor 2	Valor 3
Componente	42	43	44
Número de simulación:1	$=-\ln(\text{aleatorio()})/\text{Valor 1}$	$=-\ln(\text{aleatorio()})/\text{Valor 2}$	$=-\ln(\text{aleatorio()})/\text{Valor 3}$

Tabla 4.3 Simulación montecarlo con hoja de cálculo compuerta "B".

La siguiente columna a añadir es el tiempo de misión para el cual el sistema debe ser exitoso:

Tasa de Fallo (l)	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Tiempo de misión (Días)
Componente	42	43	44	365
Número de simulación:1	721.54	14751.64	275.09	

Tabla 4.4 Simulación montecarlo con hoja de cálculo compuerta "B".

Se añade una columna más donde se indica la condición que debe cumplirse:

Tasa de Fallo (l)	.....	Tiempo de misión (Días)	Condición
Componente	.....	365	
Número de simulación:1	.....		

Tabla 4.5 Simulación montecarlo con hoja de cálculo compuerta "B".

En la celda sombreada se escribe la condición:

$$=Si (Y (Valor Sim. Comp.42<Tiempo de Misión, Valor Sim. Comp 43<Tiempo de Misión, Valor Sim. Comp 44<Tiempo de Misión)1,0) \quad (4.9)$$

En términos de los valores obtenidos para este ejemplo, se tiene:

$$=Si(Y(721.54<365,14751.64<365,275.09<365),1,0) \quad (4.10)$$

Lo anterior se explica como sigue: se comparan cada uno de los valores obtenidos en la simulación con el tiempo de misión deseado, dado que se tiene una condición "AND" la condición da un valor de salida de "1", si todos los valores comparados son menores que el tiempo de misión; por otro lado, si alguno de los valores obtenidos son mayores al tiempo de misión obtenemos un valor "0"

El aspecto final de la tabla, se muestra a continuación:

Tasa de Fallo (l)	Valor 1	Valor 2	Valor 3	Tiempo de misión (Días)	Condición
Componente	42	43	44	365	
Número de simulación:1	721.54	14751.64	275.09		0

Tabla 4.6 Simulación montecarlo con hoja de cálculo compuerta "B".

Para el componente 45, la tabla obtenida es:

Tasa de Fallo (l)	Valor 4	Tiempo de misión (Días)	Condición
Componente	45	365	
Número de simulación:1	28928.97		0

Tabla 4.7 Simulación montecarlo con hoja de cálculo componente 45.

La condición requerida dado que es un solo componente se reduce a:

$$=SI(valor sim. Comp. 45<valor de misión),1,0) \quad (4.11)$$

Para el valor que ilustra de este ejemplo, la condición requerida es:

$$=SI(28928.97<365,1,0) \quad (4.12)$$

La Compuerta “C” está a su vez confirmada por la compuerta “D” y “E” así como por la componente 49, La construcción de la tabla es semejante a las anteriores, variando una vez más la condición. La compuerta “C” puede romperse en cada compuerta constituyente, o bien escribir una condición que la envuelva, los valores obtenidos para una simulación en particular son:

Tasa de Fallo (l)	Valor 5	Valor 6	Valor 7	Valor 8	Valor 9	Misión	Condición
Componente	46	47	48	49	50	365	
Número de simulación:1	36.10	206.07	606.36	219.67	122.72		0

Tabla 4.8 Simulación montecarlo con hoja de cálculo compuerta “C”.

En este caso, se generó una expresión que envolvió a todos los componentes de la compuerta:

$$=SI(Y(Y(606.36<365,219.67<365),(122.72<365),(Y(36.10<365,206.07<365))),1,0) \quad (4.13)$$

La expresión anterior muestra como se incrementa la complejidad de la condición a medida que aumenta el número de elementos que constituyen un sistema o una parte del sistema a analizar.

Finalmente se evalúa la no confiabilidad, para la compuerta “A” se tiene la condición:

$$=Si(O(valor de condición compuerta “B”=1,valor condición componente 45=1,valor condición compuerta “C”=1),1,0) \quad (4.14)$$

Para este ejemplo en particular:

Valor de la condición Compuerta “B”	Valor de la condición Componente 45	Valor de la condición compuerta “C”	Valor de la condición para el sistema
0	0	0	0

Tabla 4.9 Simulación montecarlo con hoja de cálculo sistema

La confiabilidad se obtiene sacando el valor de complemento al valor obtenido para el sistema, y posteriormente dividiendo el número de “1” obtenidos en la celda condición y dividiéndolo entre el número de simulaciones realizadas.

El resultado obtenido invariablemente variará con el número de simulaciones realizadas, en el siguiente gráfico se muestra como el valor de confiabilidad obtenido varía a medida que el número de simulaciones aumenta.

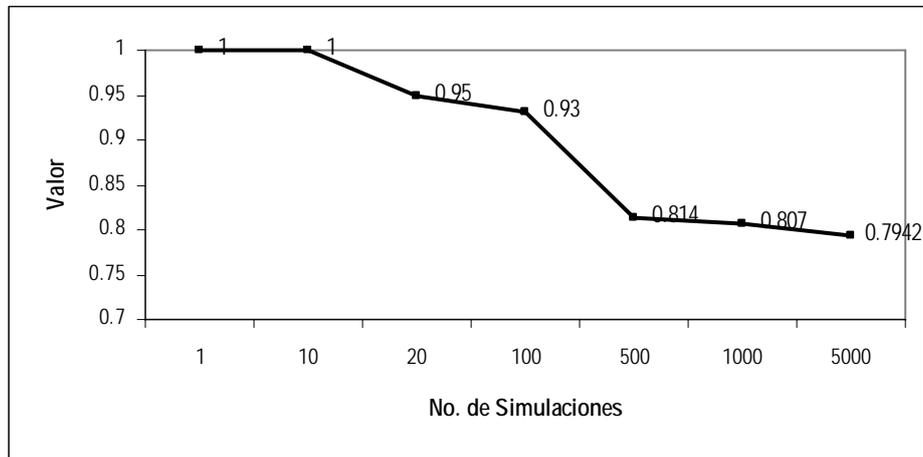


Figura 4.3 Valores de Confiabilidad con respecto al número de simulaciones.

Es claro que cuanto más se incremente el número de simulaciones, el valor obtenido converge a un valor determinado, la cuestión es saber cuantas simulaciones realizar, ya que un número muy pequeño da un resultado falso y un número elevado de simulaciones resultar tedioso o consume demasiado tiempo.

Dado que la simulación brinda un estimado y no un valor exacto, es necesario determinar un intervalo de confianza, el valor del intervalo definido previamente brinda el número de simulaciones a ser realizadas.

El valor del intervalo de confianza se obtiene fácilmente usando la función de Excel® “Intervalo de confianza” que se define por la siguiente expresión:

$$\text{Intervalo de confianza} = \text{intervalo.confianza}(\alpha, \sigma, N)$$

Donde:

$\alpha = 1 - \text{intervalo de confianza}$  (para un intervalo de confianza del 95%,  $\alpha = 0.05$ ).

$\sigma = \text{Desviación estándar de las salidas de las "N" simulaciones.}$

$N = \text{Número de simulaciones realizadas.}$

En el caso de estudio, se determinó tener un intervalo de confianza con valor del 2%; con lo que el número de simulaciones para cada subsistema es de 5000.

En el siguiente gráfico, se muestra la variación del intervalo de confianza con respecto al incremento del número de simulaciones.

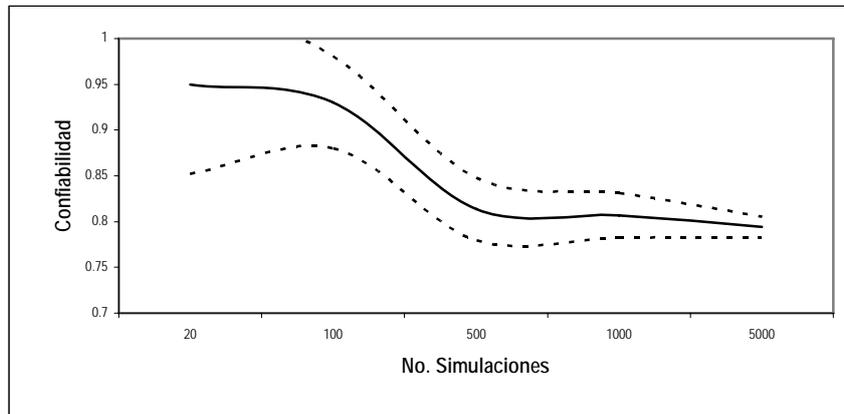


Figura 4.4 Valores de intervalos de confianza con respecto al número de simulaciones.

Las tablas siguientes indican los valores de confiabilidad para los sistemas estudiados obtenidos vía simulación. Las tablas de cada subsistema para ambos casos de estudio aparecen en el apéndice VII.

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Conf
20	0.8460	0.8560	0.8360	0.3610	0.0100
100	0.4358	0.4495	0.4221	0.4959	0.0137
365	0.0472	0.0531	0.0413	0.2121	0.0059
500	0.0158	0.0193	0.0123	0.1247	0.0035
1100	0.0004	0.0010	0.0000	0.0200	0.0006
2000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 4.10 Resultados de simulación Montecarlo para el sistema.  
Evento Tope "Producto F/E".

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Conf
20	0.9352	0.9420	0.9284	0.2462	0.0068
100	0.7254	0.7378	0.7130	0.4464	0.0124
365	0.2886	0.3012	0.2760	0.4532	0.0126
500	0.1822	0.1929	0.1715	0.3860	0.0107
1100	0.0142	0.0175	0.0109	0.1183	0.0033
2000	0.0012	0.0022	0.0002	0.0346	0.0010

Tabla 4.11 Resultados de simulación Montecarlo para el sistema.  
Evento Tope "Paro de Planta".

#### 4.4 Validación de resultados

Se han utilizado tres métodos para hallar los valores de confiabilidad y es necesario realizar un comparativo entre los valores obtenidos. Las siguientes tablas muestran el comparativo entre los tres métodos, el resultado arrojado por la evaluación de disponibilidad presenta un solo dato, que corresponde al cálculo de 365 días.

Para el evento tope “Producto F/E”:

SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.4829	0.9511	0.9510	0.9570	0.9450
100		0.7783	0.7894	0.8007	0.7781
365		0.4006	0.4098	0.4234	0.3962
500		0.2856	0.2882	0.3008	0.2756
1100		0.0635	0.0664	0.0733	0.0595
2000		0.0066	0.0084	0.0109	0.0059

SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.4829	0.9663	0.9628	0.9680	0.9576
100		0.8423	0.8478	0.8578	0.8378
365		0.5345	0.5354	0.5492	0.5216
500		0.4239	0.4208	0.4345	0.4071
1100		0.1512	0.1546	0.1646	0.1446
2000		0.0321	0.0300	0.0347	0.0253

SUBSISTEMA DE CONTROL DE PESO					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.6866	0.9820	0.9820	0.9857	0.9783
100		0.9132	0.9150	0.9227	0.9073
365		0.7179	0.7114	0.7240	0.6988
500		0.6351	0.6246	0.6380	0.6112
1100		0.3683	0.3612	0.3745	0.3479
2000		0.1627	0.1594	0.1695	0.1493

SUBSISTEMA DE AGITACIÓN					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.6328	0.9782	0.9770	0.9812	0.9728
100		0.8956	0.8898	0.8985	0.8811
365		0.6686	0.6680	0.6811	0.6549
500		0.5761	0.5714	0.5851	0.5577
1100		0.2972	0.2994	0.3121	0.2867
2000		0.1101	0.1112	0.1199	0.1025

SUBSISTEMA DE INICIADOR					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.4531	0.9586	0.9624	1.0000	0.9571
100		0.8095	0.8104	0.8213	0.7995
365		0.4624	0.4654	0.4792	0.4516
500		0.3476	0.3458	0.3590	0.3326
1100		0.0978	0.0946	0.1027	0.0865
2000		0.0146	0.0116	0.0146	0.0086

SISTEMA EVENTO TOPE "PRODUCTO F/E"					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.0319	0.8463	0.8460	0.8560	0.8360
100		0.4340	0.4358	0.4495	0.4221
365		0.0475	0.0472	0.0531	0.0413
500		0.0154	0.0158	0.0193	0.0123
1100		0.0001	0.0004	0.0010	0.0000
2000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tablas 4.12 Comparativo entre valores de confiabilidad utilizando diferentes técnicas.  
Evento tope "Producto Fuera de especificación"

Para el evento tope "Paro de planta":

SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.7162	0.9798	0.9786	0.9826	0.9746
100		0.9029	0.8984	0.9068	0.8900
365		0.6885	0.6898	0.7026	0.6770
500		0.5995	0.6042	0.6178	0.5906
1100		0.3234	0.3264	0.3394	0.3134
2000		0.1274	0.1354	0.1449	0.1259

SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.9653	0.9971	0.9980	0.9992	0.9968
100		0.9856	0.9898	0.9926	0.9870
365		0.9454	0.9578	0.9634	0.9522
500		0.9240	0.9368	0.9435	0.9301
1100		0.8219	0.8260	0.8365	0.8155
2000		0.6604	0.6596	0.6727	0.6465

SUBSISTEMA DE CONTROL DE PESO					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.5269	0.9705	0.9698	0.9745	0.9651
100		0.8603	0.8562	0.8659	0.8465
365		0.5739	0.5794	0.5931	0.5657
500		0.4655	0.4550	0.4688	0.4412
1100		0.1802	0.1756	0.1861	0.1651
2000		0.0416	0.0418	0.0473	0.0363

SUBSISTEMA DE AGITACIÓN					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.9447	0.9975	0.9976	0.9990	0.9962
100		0.9871	0.9896	0.9924	0.9868
365		0.9472	0.9456	0.9519	0.9393
500		0.9246	0.9330	0.9399	0.9261
1100		0.8157	0.8172	0.8279	0.8065
2000		0.6563	0.6556	0.6688	0.6424

SUBSISTEMA DE INICIADOR					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.8192	0.9918	0.9916	0.9941	0.9891
100		0.9575	0.9578	0.9634	0.9522
365		0.8350	0.8334	0.8437	0.8231
500		0.7714	0.7710	0.7826	0.7594
1100		0.5148	0.5232	0.5370	0.5094
2000		0.2559	0.2574	0.2695	0.2453

SUBSISTEMA DE PRECALENTADOR					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.9738	0.9986	0.9996	1.0000	0.9990
100		0.9929	0.9932	0.9955	0.9909
365		0.9742	0.9730	0.9775	0.9685
500		0.9645	0.9686	0.9734	0.9638
1100		0.9131	0.9156	0.9233	0.9079
2000		0.7920	0.7830	0.7944	0.7716

SISTEMA EVENTO TOPE "PARO DE PLANTA"					
		KITT	Simulación Montecarlo		
t	Disponibilidad	Confiabilidad	Confiabilidad		
Días	A(t)	R(t)	R(t)	Máx. R(t)	Mín R(t)
20	0.2745	0.9367	0.9352	0.9420	0.9284
100		0.7185	0.7254	0.7378	0.7130
365		0.2879	0.2886	0.3012	0.2760
500		0.1774	0.1822	0.1929	0.1715
1100		0.0184	0.0142	0.0175	0.0109
2000		0.0005	0.0012	0.0022	0.0002

Tablas 4.13 Comparativo entre valores de confiabilidad utilizando diferentes técnicas.  
Evento tope "Paro de Planta"

Los resultados obtenidos son interesantes, en las tablas se puede constatar que el valor de disponibilidad con mayor disparidad varía un 8% con respecto a los valores de confiabilidad obtenidos por KITT y simulación Montecarlo. Dado que el objetivo de la simulación Montecarlo es el validar los resultados obtenidos, el objetivo se ha cumplido satisfactoriamente.

#### 4.5 Análisis y reporte de resultados

Una vez realizados los cálculos, los resultados obtenidos son analizados con el fin de determinar el comportamiento del sistema. El análisis se presenta por caso de estudio.

Para el sistema con evento tope "Producto fuera de especificación":

El cálculo arroja que a los 20 días de operación del sistema la confiabilidad de 0.8460, en otras palabras la probabilidad que el producto se encuentre dentro de calidad es del un 84.6%.

A medida que el tiempo comienza a pasar, el valor de confiabilidad cae drásticamente; en el tiempo 100, la probabilidad de que el producto se encuentre “fuera de especificación” por causa de fallo del sistema es de un 56.4 % (valor complementario al de confiabilidad que, para este lapso de tiempo se define en 43.6 %)

Al llegar a un tiempo de 365 días (Un año de operación), la probabilidad de ocurrencia del evento tope debido al fallo del sistema es del orden del 95% valor que representa un evento prácticamente seguro.

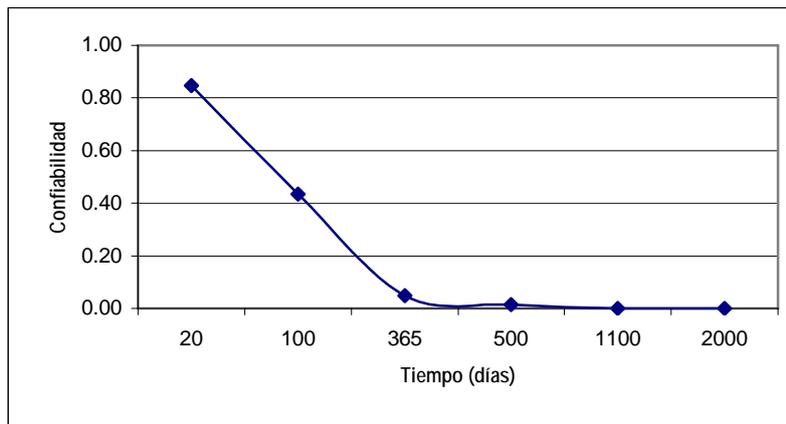


Figura 4.5 Variación de confiabilidad con respecto al tiempo.  
Sistema en estudio con evento tope “Producto F/E”

Existen subsistemas que son más débiles que otros, es notable como el de “alimentación” a los 100 días de operación tiene una probabilidad de fallar mayor al 20%, para este mismo período sólo un subsistema sobre pasa un valor de confiabilidad del 90% (el de “control de peso”).

El sistema más débil es el de control de peso, y dada la construcción e interrelación en el sistema su peso específico sobre el valor de confiabilidad del mismo es elevado, si se mejora este subsistema mejorará en buena medida el comportamiento del sistema.

El subsistema de alimentación a su vez está formando conjuntos de corte y componentes, por ello se indaga cuales de estos son los más débiles.

Verificando los valores de los conjuntos de corte, se encuentra que los valores de confiabilidad son altos; sin embargo, para un horizonte de 365 días cinco componentes individuales, que a la vez constituyen conjuntos de corte, poseen valores de confiabilidad de alrededor de un 85% (las componentes 29, 30, 31,32, 41 que corresponden a

sensores y transmisores para los tres primeros casos y al sistema de control en los dos últimos).

La construcción de los subsistemas así como del sistema es débil, existen demasiados elementos individuales que causan el fallo de los subsistemas o del sistema en conjunto. Por otro lado, los componentes que poseen un peso importante en la probabilidad de ocurrencia de fallo son insustituibles y costosos.

Para el evento tope “Paro de planta”, los resultados arrojados muestran mejoría; para los primeros 20 días de operación, la probabilidad que el sistema opere correctamente es del orden del 94%; en los primeros 100 días de operación la probabilidad de fallo sube a un 28%, en tanto que para un horizonte de un año la probabilidad de fallo es superior al 70 %.

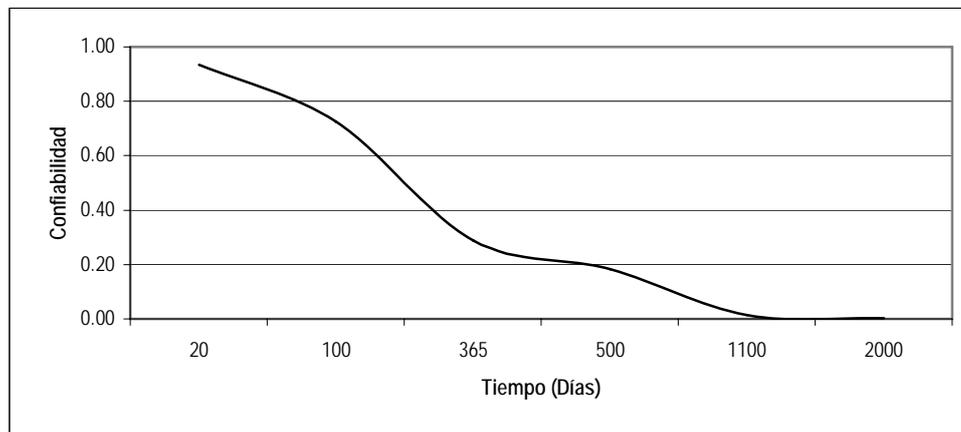


Figura 4.6 Variación de confiabilidad con respecto al tiempo.  
Sistema en estudio con evento tope “Paro de Planta”

El análisis de los subsistemas revela nuevamente que el sistema de alimentación es uno de los más débiles, pero la mayor contribución a un paro de planta se da por un eventual fallo del sistema de control de peso, en el árbol de fallo para este subsistema se incluyen tres nuevos elementos con respecto al caso “material fuera de especificación”; la inclusión de la componente 63, cuyo valor de confiabilidad para un horizonte de 365 días es del orden del 77%, es la componente con menor valor de confiabilidad en este subsistema, todas las demás componentes y conjuntos de corte presentan valores de confiabilidad por arriba del 90%. El elemento involucrado es también costoso e insustituible.

En términos de confiabilidad es más probable que exista un problema de calidad que un paro de planta, esto se debe a que para ocurra el último evento se requiere que un mayor número de elementos fallen,

la construcción de la planta es “confiable” al evitar una pérdida de operaciones.

El análisis muestra que un número de elementos pequeño contribuye enormemente en los valores de confiabilidad del sistema, esto es importante ya que debe recordarse que el sistema en estudio es a su vez sólo una parte o subsistema de toda la planta industrial, en conjunto la planta consta de alrededor de unas 600 componentes.

Las recomendaciones generales para este sistema son:

Privilegiar un programa de mantenimiento preventivo sobre el correctivo, dicho programa debe sustentarse en base a los resultados arrojados por el estudio de confiabilidad.

Los valores de confiabilidad para las componentes que contribuyen con un peso específico mayor al resultado de confiabilidad del sistema deben mantenerse elevados. (Mayor a un 90%)

En el caso que aplique, realizar modificaciones físicas en las áreas de mayor problemática. Debe recalcar que esto es costoso.

Implementar un programa de capacitación al personal sobre el tópico de confiabilidad.

## 5. CONCLUSIONES

La metodología presentada en este trabajo es un primer paso en la elaboración de la estandarización de los estudios de confiabilidad dirigidos a sistemas industriales que abarque sistemas no reparables, como cualquier metodología, puede y debe ser mejorada.

En primera instancia el objetivo general, así como los objetivos parciales propuestos en esta tesis se cumplieron satisfactoriamente.

Como primer punto, se definieron los conceptos más importantes involucrados en un estudio de confiabilidad, así mismo, se determinaron los fundamentos matemáticos en los cuales se basan los conceptos definidos.

Se propuso una metodología de estudio para sistemas industriales no reparables enfocado a prevenir problemas de calidad y fallos en el proceso, los cuales generalmente son costosos además de poner en riesgo la imagen e incluso las instalaciones físicas de cualquier sistema industrial.

La metodología propuesta, se compone de ocho pasos y para cada uno de estos pasos se dieron las razones de su inclusión; en la metodología se incluyen técnicas para analizar cualitativa y cuantitativamente a un sistema industrial.

El análisis cuantitativo se evaluó por tres técnicas diferentes: disponibilidad, KITT y simulación; la técnica de disponibilidad sugiere un cálculo rápido que indica la probabilidad de fallo de un sistema a un horizonte previsto, la técnica KITT evalúa puntos débiles del sistema para el horizonte en estudio y finalmente la simulación se emplea como medida de validación y análisis.

La simulación se realizó en forma fácil y eficiente usando una hoja de cálculo, con ello el uso de software sofisticado pero costoso que existe en el mercado no es necesario; de esta forma un estudio de confiabilidad está al alcance de más compañías.

La metodología se confrontó con un sistema real de estudio: una planta petroquímica; cabe señalar que este tipo de sistemas son de los sistemas industriales más complejos.

El caso de estudio fue sometido punto por punto a la metodología propuesta con resultados exitosos; los datos recabados para el análisis cuantitativo fueron por demás interesantes, ya que se mostró el como una pequeña cantidad de componentes puede influir en el comportamiento del sistema

A partir de un análisis de confiabilidad se identificaron partes débiles, que pueden ser atacadas implementando una política de rediseño o mantenimiento apropiada.

Un estudio de confiabilidad para un sistema industrial es ampliamente recomendable para fortalecer la filosofía de control de calidad de la compañía. Además, el estudio va ligado ampliamente a la evaluación de riesgo que es ya exigida para por legislaciones en muchos países.

Finalmente, este trabajo pretende vincular a la teoría y práctica, analizando y solucionando problemáticas reales del mundo moderno, objetivo principal de la ciencia de investigación de operaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. "A New Approach To Solve Dynamic Fault Trees"  
Suprasad Amari, Glenn Dill, Eileen Howald  
Relex Software Corporation
2. "Análisis de Confiabilidad del Sistema de Transmisión Regional Usando Simulación Montecarlo"  
Lina Paola Garces Negrete, Oscar Gomez Carmona  
Universidad Tecnológica de Pereira, 2003
3. "Analysis of Complex Repairable Systems"  
Daniel Jacob, Suprasad V. Amari  
Relex Software Corporation
4. "Application of Monte Carlo Simulation to System Reliability Analysis"  
Dennis Alexander  
ExxonMobil Chemical
5. "Application of the Reliability in the Project Optimization of Chemical Plants Stoppages"  
PhD Luis Amendola  
Departamento de proyectos de Ingeniería  
Universidad Politécnica de Valencia España.
6. "Calculating MTTF when you have Zero Failures"  
Reliability Articles  
Relex Software Corporation
7. "Condition\_Based Maintenance"  
Reliability Articles  
PhD Suprasad Amari  
Relex Software Corporation
8. "Confiabilidad en sistemas eléctricos"  
Programa de Investigaciones en Energía  
Universidad de Chile, 1999
9. "DC/DI PROCESS TRAINING MANUAL"  
MONSANTO COMPANY (1974)
10. "Eastman Chemical's Success Story"  
Gary Hallen and Robert J. Latino  
American Society for Quality, 2003
11. "Elements of Reactor Design, Operations and Safety"  
George E. Apostolakis  
Massachusetts Institute of Technology, Fall 2005

12. "Investigación de Operaciones"  
Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman  
McGraw-Hill 2001
13. "Fault Tree Construction: Events and gates"  
Reliability Articles  
Relex Software Corporation
14. "Fault Tree Construction: NOT Logic Gates"  
Reliability Articles  
Relex Software Corporation
15. "Historia e historias de Matemáticas"  
Mariano Perero  
Grupo Editorial Iberoamérica
16. "Modelación y simulación"  
Antoni Guasch, Miguel Ángel Piera, Joseph Casanovas, Jaume Figueras  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Ed. Alfaomega.
17. Moder Plastics World Encyclopedia (2000)
18. "Monte Carlo Simulation using Excel for Predicting Reliability of a Geothermal Plant"  
Daniela E. Popescu, Corneliu Popescu, Gianina Gabor  
University of Oradea, Oradea, Romania (2003)
19. "MTTF versus MTBF"  
Reliability Articles  
Relex Software Corporation
20. "Probability and Statistics for Engineers"  
Richard L. Scheaffer, James T. McClave
21. "Probabilistics Safety Analysis (PSA) Basics II"  
Michael W Golay.  
Summer Courses 2004.  
Massachusetts Institute of Technology
22. OREDA-92 "Offshore Reliability Data Handbook"  
DET NORSKE VERITAS INDUSTRI NORGE AS DNV TECHNICA.  
2<sup>nd</sup> Edition
23. "Reliability Prediction of Electronic Equipment"  
Military HandBook  
Department Of Defense  
USA Government, 1991
24. "Practical Reliability Tools For Refineries And Chemical Plants"

Article

H. Paul Barringer

Barringer & Associates, Inc, TX

25. "Probability Risk Assessment (PRA) Structure and Results"

Michael W. Golay

Summer Courses 2004

Massachusetts Institute of Technology

26. "Rationalizing Reliability"

Reliability Articles

Relax Software Corporation

27. "Reliability Engineering and Risk Assessment"

Ernest J. Henley, Hiromitsu Kumamoto

Prentice Hall 1981.

28. "Reliability Engineers: Why Certify?"

Reliability Articles

Relax Software Corporation

29. "Reliability Engineering Principles Optimizing System Design"

Reliability Articles

Relax Software Corporation

30. "Reliability Evaluation of Engineering Systems"

Roy Billinton, Ronald N. Allan

Plenum Press 1992

21. "Reliability Part I Concepts and Terminology"

Reliability Articles

Relax Software Corporation

32. "Reliability, Quality and Safety for Engineers"

B.S. Dhillon.

CRC PRESS 2004

33. "Reliability, Testing & Characterization"

Sandia Memos

Sandia National Labs.

34. "Risk-Informed Operational Decision Management (RIODM): Risk, Event Trees and Fault Trees"

Michael W. Golay

Open Courses, Fall 2005

Massachusetts Institute of Technology

35. "Selecting the Right Tool to Model System Behavior"

Reliability Articles.

Relax Software Corporation

## Apéndice I

### DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS EN ESTUDIO

#### Sistema de enfriamiento

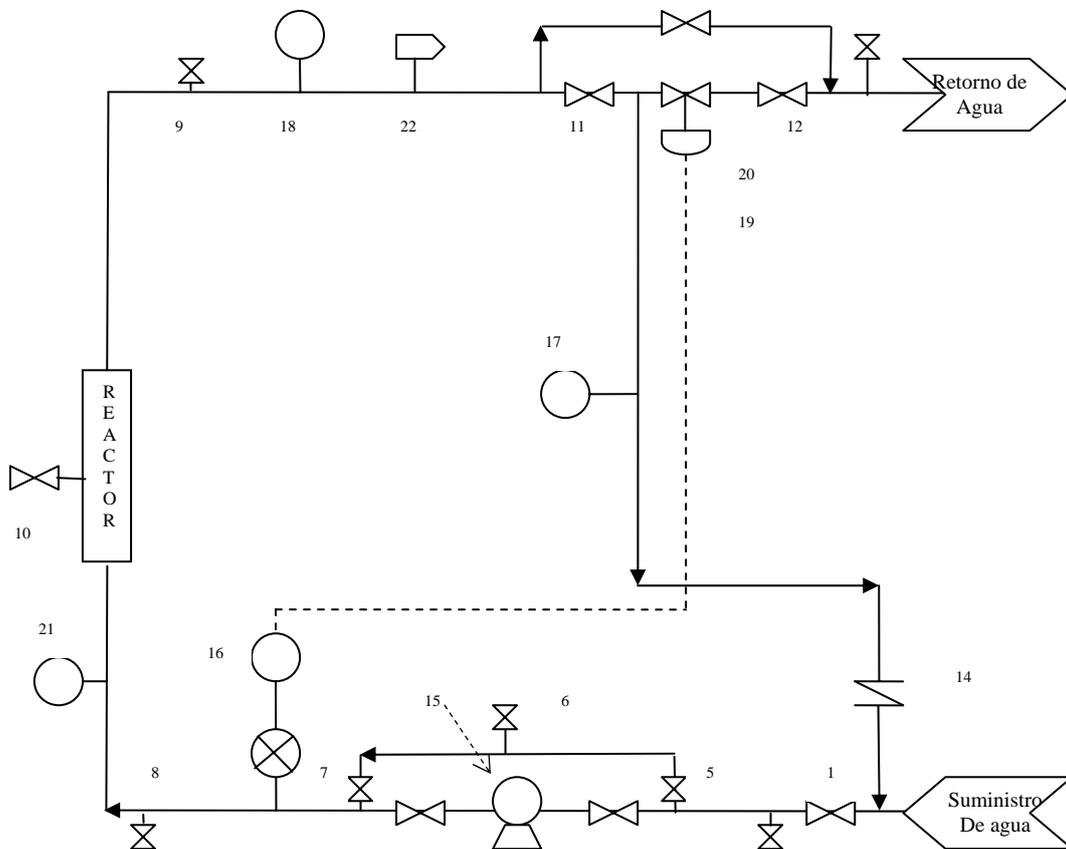


Figura AI.1 Sistema de enfriamiento  
Fuente: Autor

Núm. De Ítem.	Clave del elemento	Nombre	Característica
1	VA-01	Válvula de compuerta 2 pulgadas	Controla el acceso de agua de torre Al proceso.
2	VA-02	Válvula de globo 1 pulgada	Dren.
3	VA-03	Válvula de Compuerta 2 pulgadas	Alimentación de la línea a la bomba De recirculación del reactor uno.
4	VA-04	Válvula de Compuerta 2 pulgadas	Salida de Bba de recirculación R-1.
5	VA-05	Válvula de globo 2 pulgadas	Acceso de agua de torre al By-pass
6	VA-06	Válvula de globo ½ pulgada	Dren de by-pass.
7	VA-07	Válvula de globo 2 pulgadas	Salida de agua del By-Pass.
8	VA-08	Válvula de globo 1 pulgada	Dren.

9	VA-09	Válvula de globo ¾ pulgada	Venteo.
10	VA-10	Válvula de globo 2 pulgadas	Dren de la chaqueta del R-1.
11	VA-11	Válvula de compuerta 2 pulgadas	Acceso a Neumática.
12	VA-12	Válvula de compuerta 2 pulgadas	Salida de Neumática.
13	VA-13	Válvula de Globo 2 pulgadas	Válvula de by-pass a la neumática.
14	VA-14	Válvula Check 3 pulgadas	Controla la recirculación de agua de La salida del reactor a la entrada de Agua de torre.
15	BA-01	Bomba de Agua	Bomba de recirculación de agua de enfriamiento del Reactor 1.
16	TIC-01	Sensor e indicador de control de temperatura.	Sensa la temperatura del agua de enfriamiento.
17	PC-01	Sensor de flujo	Registra el flujo de agua que retorna a proceso, sin enviarse a la torre. (indicativo)
18	PSV-01	Indicador de control de presión	Indicador de seguridad de alta y baja Presión. Indicativa.
19	AC-01	Actuador de la Neumática de control de agua de enfriamiento	Envía la orden apertura/cierre a la Válvula neumática de control.
20	VN-01	Válvula neumática de control de flujo agua hacia el reactor	A través de la apertura/cierre de la misma, controla la temperatura de entrada del agua al reactor.
21	FT-01	Sensor y transmisor de Flujo	Registra la cantidad de flujo de agua al reactor, indicativa.
22	SS-00	Sumadora del sistema de control	Realiza el cálculo de diferenciales de temperatura, enviando la orden de apertura-cierre a la neumática

Tabla AI.1 Elementos del sistema de enfriamiento.

## Sistema de alimentación

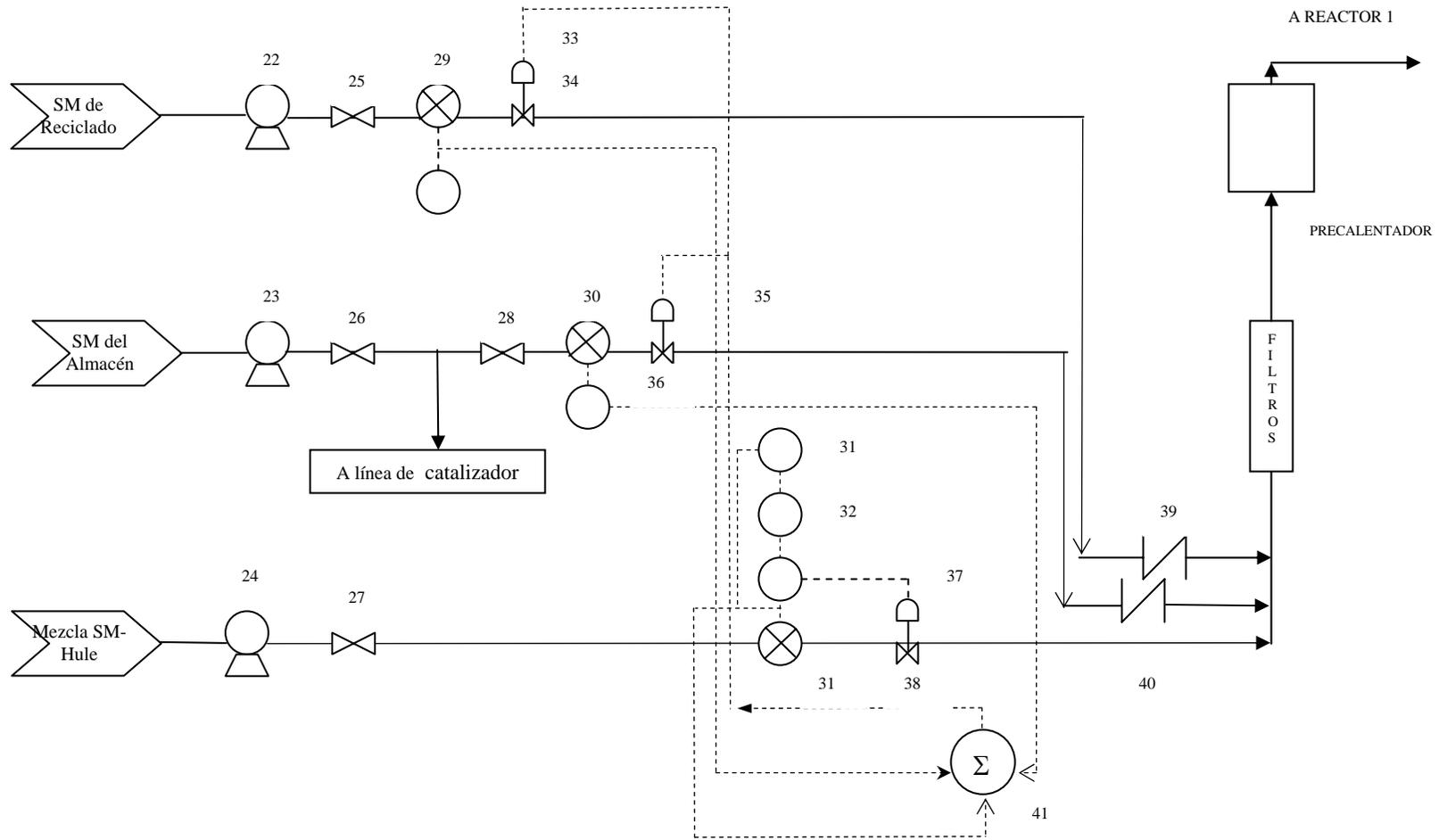


Figura A1.2 Sistema de alimentación.  
Fuente Autor

<b>Núm. De Ítem.</b>	<b>Clave del elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Característica</b>
22	BA-02	Bba de Reciclo	Alimenta SM reciclado al R-1.
23	BA-03	Bba SM fresco	Alimenta SM fresco al R-1
24	BA-04	Bba SM-Hule	Alimenta solución SM-Hule al reactor 1.
25	VA-15	Válvula de compuerta 1 pulgada	Acceso de SM del reciclo hacia mezclador.
26	VA-16	Válvula de compuerta 1 ½ pulg	Acceso de SM fresco a unión "T"
27	VA-17	Válvula de compuerta 3 pulg	Acceso de SM-Hule hacia el mezclador.
28	VA-18	Válvula de Compuerta 1 ½ pulg	Acceso de SM fresco hacia el mezclador
29	FT-02	Sensor y transmisor De flujo	Mide la cantidad de SM reciclado alimentado al Reactor. Envía una señal al Sistema de control.
30	FT-03	Sensor y transmisor de flujo	Mide la cantidad de SM fresco alimentado a proceso.
31	FT-04	Sensor y transmisor de flujo	Mide la cantidad de SM-Hule Alimentado a proceso.
32	FRR	Relacionador	En base a una relación establecida de Hule-SM , Envía una señal a la neumática de control de hule.
33	AC-02	Actuador de Neumática de Reciclo.	Recibe una señal y envía la orden apertura/ cierre a la neumática.
34	VN-02	Neumática de Reciclo	Regula el flujo de SM reciclado.
35	AC-03	Actuador de la Neumática de SM	Recibe una señal y envía orden Apertura/cierre a la neumática.
36	VN-03	Neumática de SM	Regula el flujo de SM fresco.
37	AC-04	Actuador de la Neumática de Hule.	Recibe una señal y envía orden Apertura/cierre a la neumática.
38	VN-04	Neumática de Hule.	Regula el flujo de Hule.
39	VA-19	Válvula Check 1 pulg	Permite sólo el flujo unilateral de SM reciclado al proceso.
40	VA-20	Válvula Check 1 ½ pulg	Permite sólo el flujo unilateral de SM fresco al proceso.
41	SS-01	Sumadora del Sistema de control	Realiza el comparativo de las corrientes Envía señales a los actuadotes para que A su vez, regulen las neumáticas de alimentación.

Tabla AI.2 Elementos del sistema de alimentación.

### Sistema de precalentador

<b>Núm. De Ítem.</b>	<b>Clave del elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Característica</b>
42	VA-21	Válvula de compuerta de 3 pulg	Salida de vapor de cabezal a ramal del precalentador.
43	VA-22	Válvula de compuerta de 3 pulg	Válvula colocada antes del dren.
44	VA- 23	Válvula de compuerta de 3 pulg	Válvula colocada después del dren.
45	VA-24	Válvula de compuerta de ¾ pulg	Dren de condensados.
46	VN-04	Válvula neumática de control de vapor	Regula el flujo de vapor que ingresa al precalentador, dependiendo de la señal enviada por el actuador.
47	AC-05	Actuador de la neumática de vapor	Envía la señal abrir/Cerrar a la neumática de vapor, dependiendo de la temperatura que presente la corriente de alimentación.
48	SS-02	Sumadora	Envía una señal de retorno desde el sistema de control hacia el actuador de la

			válvula de vapor; Dicha señal, es el resultado de sumas entre las temperaturas de las corrientes de entrada al reactor, así como la temperatura de la reacción, en el interior del reactor.
49	TIC-02	Sensor e indicador de control de temperatura.	Verifica la temperatura de la corriente a la salida del precalentador, envía una señal a la sumadora.
50	TIC-03	Sensor e indicador de control de temperatura	Verifica la temperatura de la reacción, al interior del reactor uno. Envía una señal a la sumadora

Tabla AI.3 Elementos del sistema de precalentador.

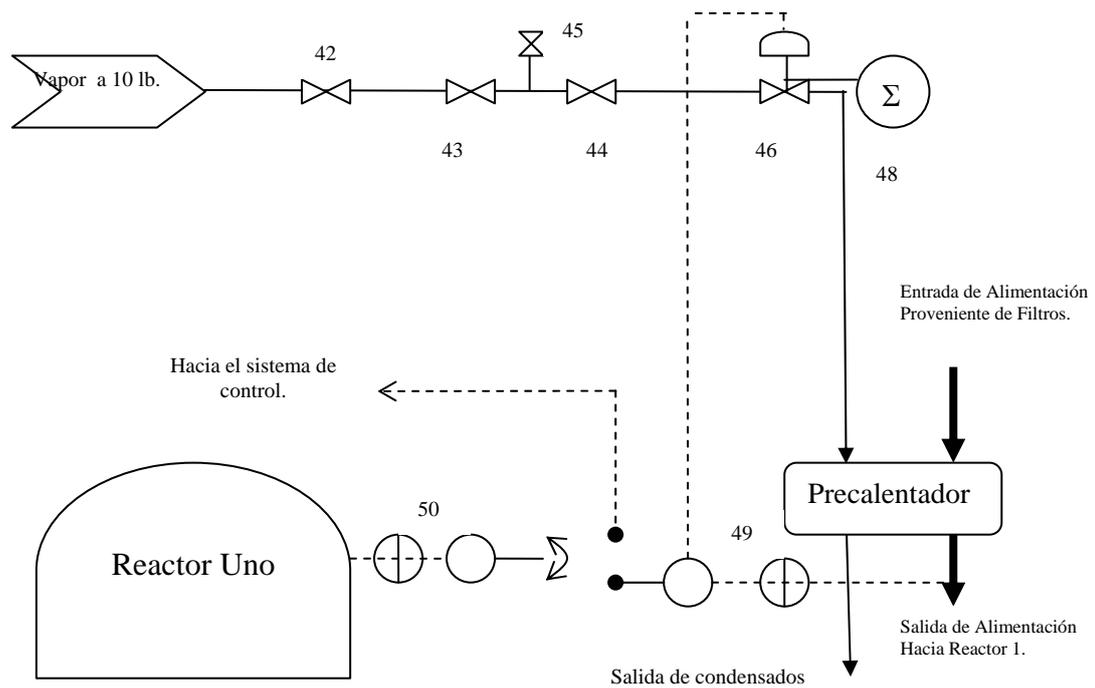


Figura AI.3 Sistema de precalentador.  
Fuente: Autor.

## Sistema de iniciador

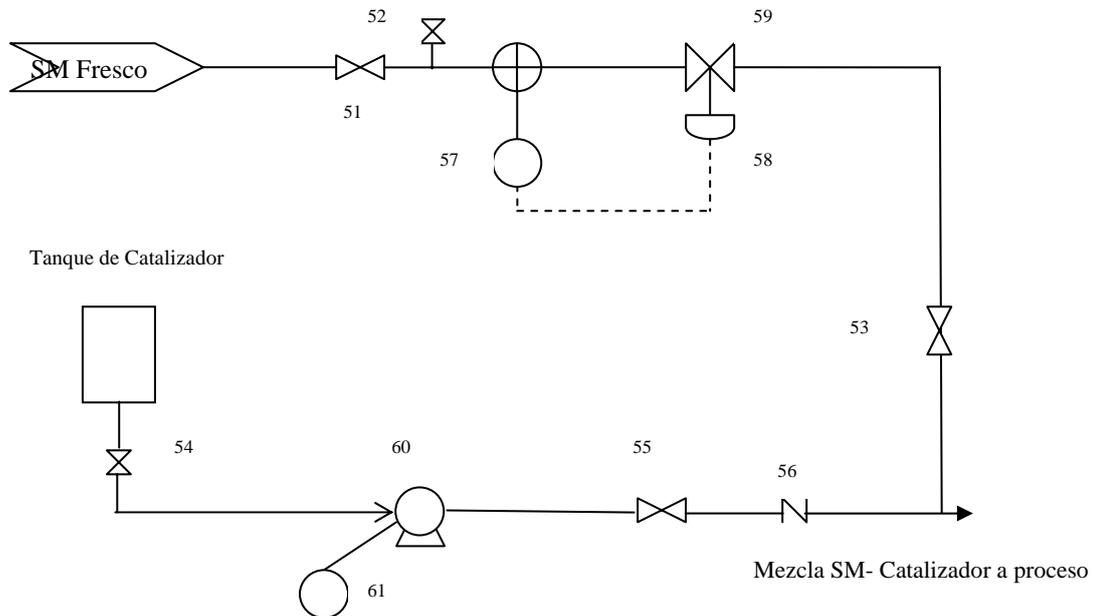


Figura AI.4 Sistema de iniciador.  
Fuente: Autor

<b>Núm. De Ítem.</b>	<b>Clave del elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Característica</b>
51	VA-25	Válvula de compuerta de 1 pulg	Permite el flujo de SM desde el almacén a la línea de catalizador.
52	VA-26	Válvula de Globo de ½ pulg	Dren de la línea de SM de arrastre de catalizador.
53	VA-27	Válvula de compuerta de ½ pulg	Colocada después del controlador de flujo de SM.
54	VA-28	Válvula de compuerta de ½ pulg	Permite el flujo de catalizador desde el tanque hacia la bba.
55	VA-29	Válvula de compuerta de ½ pulg	Colocada después de la bba, permite el paso de catalizador hacia la corriente de arrastre.
56	VA-30	Válvula Check ½ pulg	Permite el flujo unidireccional de catalizador, impide el paso de SM.
57	FT-05	Sensor y transmisor de flujo.	Mide la cantidad de SM que pasa a través de la línea de arrastre, envía una señal al actuador de la válvula neumática.
58	AC-06	Actuador de la neumática de SM de arrastre.	Envía una orden de cerrar/abrir a la válvula neumática, en base al flujo medido.
59	VN-06	Válvula neumática de la línea de arrastre de catalizador	Regula el flujo de catalizador a la línea de arrastre.
60	BA-05	Bomba de Iniciador	En base a una relación determinada, la bba envía el flujo de iniciador requerido a la línea de arrastre.
61	SS-03	Sistema de control	En base a una relación y dependiendo de la cantidad de catalizador suministrada, envía la señal a la bba de catalizador con el

			fin de regular el flujo.
--	--	--	--------------------------

Tabla AI.4 Elementos del sistema de iniciador.

### Sistema de control de Peso.

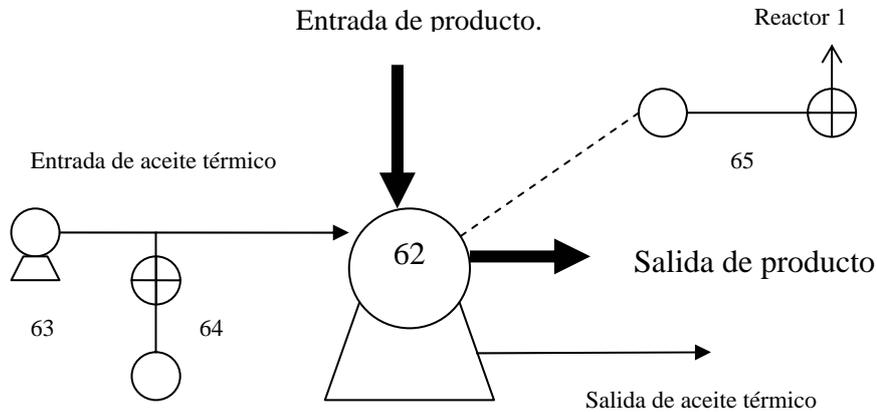


Figura AI.5 Sistema de control de peso  
Fuente: Autor

<b>Núm. De Ítem.</b>	<b>Clave del elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Característica</b>
62	BA-06	Bomba de descarga del Reactor 1.	Controla el peso del reactor al variar las revoluciones de salida. Dicho cambio en su frecuencia de salida que obedece a una señal enviada por el sensor de peso, colocado en la base del reactor.
63	BA-07	Bomba de Aceite térmico.	Envía aceite térmico a 180°C hacia el la bomba de descarga del reactor así como a la línea de transferencia entre este y el resto del proceso.
64	TIC-04	Sensor e indicador de temperatura del aceite térmico.	Verifica la temperatura a la cuál entra el aceite térmico a las partes del proceso en las cuales es necesario.
65	WICA-01	Sensor e indicador de Peso del reactor 1	Verifica que el peso del reactor 1, sea el adecuado, dependiendo del producto a realizar.
66	SS-04	Sistema de Control	Sistema de control. Envía una señal incrementar/reducir las revoluciones a la bomba de descarga para mantener el peso.

Tabla AI.5 Elementos del sistema de control de peso.

## Sistema de agitación.

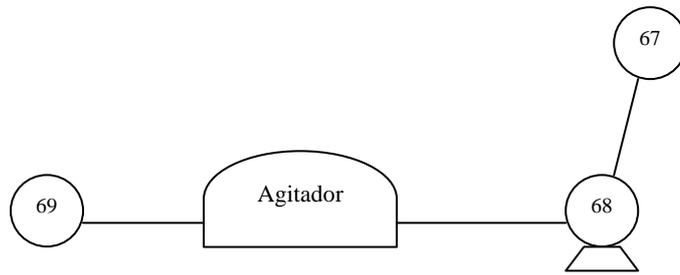


Figura AI.6 Sistema de agitación.  
Fuente: Autor.

<b>Núm. De Ítem.</b>	<b>Clave del elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Característica</b>
67	BA-07	Sistema de control	De acuerdo a una salida determinada, envía una señal al motor del agitador.
68	BA-08	Motor de agitador	De acuerdo a la señal recibida, determina las RPM's a las cuales el agitador gira.
69	SRPM-01	Sensor de RPM's	Verifica que la salida ordenada por el sistema de control sea la correcta.

Tabla AI.6 Elementos del sistema de agitación.

## Apéndice II

### ÁRBOLES DE FALLO

Las siguientes figuras representan a los árboles de fallo de cada uno de los subsistemas involucrados en los dos eventos tope, así mismo, se incluye una breve descripción de los motivos de inclusión-exclusión de determinados elementos y una tabla con los elementos (eventos básicos) que conforman cada uno de los subsistemas.

- a) *Árboles de fallo que representan a los subsistemas involucrados en el evento tope “Producto Fuera de Especificación”.*

#### *Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.*

Para alcanzar el evento tope el flujo de agua debe variar significativamente y este fallo provoca un incremento en la temperatura de la misma, haciendo difícil el control de la reacción que a su vez provoca incrementa aun más la temperatura del agua, se supone que la bomba de agua trabaja a determinadas revoluciones, sin que la salida de la misma pueda variar. Lo anterior nos lleva a realizar el árbol de falla del sistema de enfriamiento sin incluir a la bomba de alimentación de agua.

La razón para realizar esta exclusión, se debe a la característica que debe tener un evento básico para ser representado. Por un lado, el incluir como fallo un paro en la bomba llevaría hacia otro evento tope, no el que estamos analizando; por otra parte el incluir como fallo un evento tal como “paro momentáneo” de la bomba de agua de alimentación, entraría en contradicción con la definición del tipo de sistema que se hizo al inicio.

La inclusión de las válvulas de drenado en este punto, también parecería no ser muy claro para la ocurrencia del evento tope en cuestión, el hecho de incluirlos, es que un el conjunto de válvulas de dren abiertas, reduciría la cantidad de agua de enfriamiento alimentada provocando el evento tope.

<b>Número</b>	<b>Componente y evento representado</b>	<b>Número</b>	<b>Componente y evento representado</b>
3	Válvula de Globo Dren Abierto.	14	Válvula Check Válvula Dañada.
9	Válvula de Globo Dren Abierto.	16	Sensor e indicador De temperatura. Fallo en indicador.
10	Válvula de Globo. Dren abierto.	19	Actuador de la Neumática. Fallo en actuador.
11	Válvula de Compuerta Fallo en Válvula	20	Válvula neumática. Fallo en Neumática
12	Válvula de Compuerta Fallo en Válvula	22	Sistema de control. Fallo en sistema de control.
13	Válvula de Globo Fallo en Válvula		

Tabla All.1 Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.  
Evento tope “Producto Fuera de especificación”.

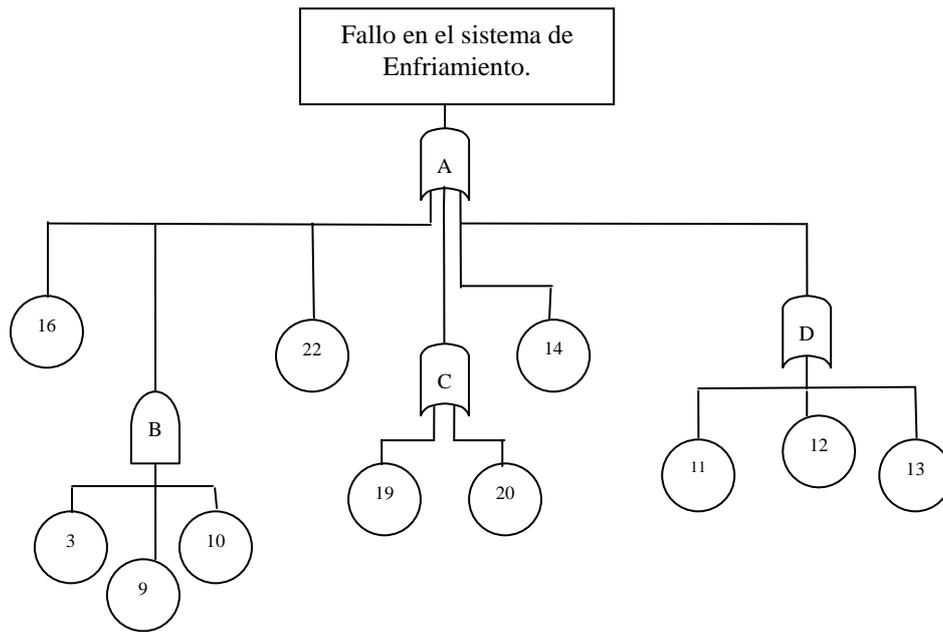


Figura AII.1 Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.  
 Evento tope "Producto fuera de especificación (F/E)".  
 Fuente: Autor.

**Árbol de fallo para el sistema de alimentación.**

En este sistema, nuevamente nos encontramos con bombas de alimentación, las cuales deben trabajar continuamente y un fallo "momentáneo" entra en contradicción con la definición del sistema. Con algunos otros componentes, tales como válvulas, un fallo acarrearía otro evento tope, la misma lógica acusan algunos otros componentes del diagrama no incluidos. El árbol de fallo resultante, se muestra en la siguiente figura.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
29	Sensor y transmisor de flujo de reciclo Fallo.	36	Neumática de SM Fallo.
30	Sensor y transmisor de Flujo SM Fallo.	37	Actuador Neumática SM-Hule. Fallo.
31	Sensor y trasmisor de Flujo Hule-SM Fallo.	38	Neumática de SM-Hule. Fallo.
32	Relacionador de Hule Fallo.	39	Válvula Check de corriente de Alimentación de Reciclo Fallo.
33	Actuador de Neumática de Reciclo Fallo.	40	Válvula check de corriente de Alimentación de SM.
34	Válvula Neumática de Reciclo Fallo.	41	Sistema de control. Fallo.
35	Actuador de Neumática de SM Fallo.		

Tabla 2. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de alimentación.  
 Evento tope "Producto Fuera de especificación".

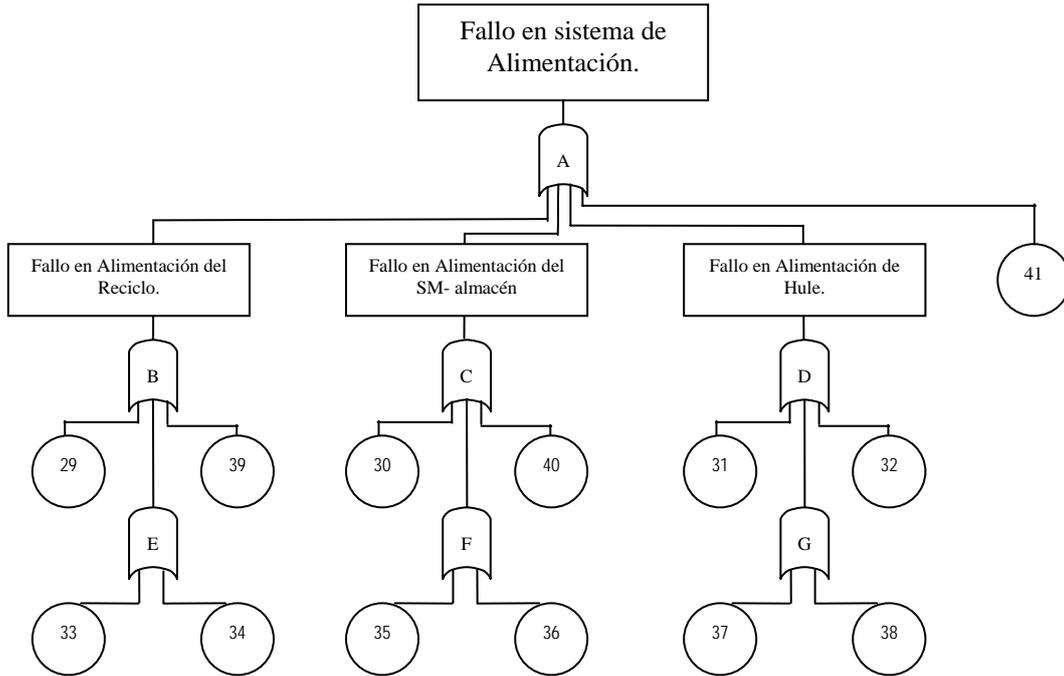


Figura AII.2 Árbol de fallo para el sistema de alimentación.  
 Evento tope "Producto fuera de especificación (F/E)".  
 Fuente: Autor.

**Árbol de Fallo del sistema de iniciador.**

El evento tope producido por este sistema, incluye en este caso a la bomba de alimentación. El motivo es que la bomba si actúa de manera variante alimentando catalizador al reactor de acuerdo a una relación catalizador-SM, previamente establecida. También, se incluye la neumática de alimentación de SM.

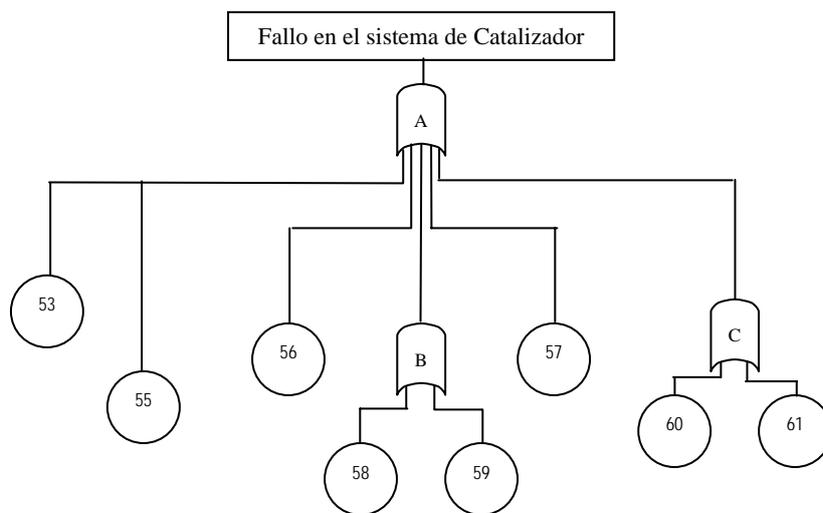


Figura AII.3 Árbol de fallo para el sistema de iniciador.  
 Evento tope "Producto fuera de especificación (F/E)".

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
53	Válvula de compuerta Fallo.	58	Actuador de la neumática Fallo.
55	Válvula de Compuerta Fallo.	59	Válvula Neumática Fallo.
56	Válvula Check Fallo.	60	Bomba de Flujo de catalizador Fallo.
57	Sensor y trasmisor de flujo Fallo.	61	Sistema de Control Fallo.

Tabla 3. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de iniciador.  
Evento tope "Producto Fuera de especificación"

### *Árbol de Fallo del sistema de control de peso.*

En este árbol se incluye a la bomba de descarga y el sensor de peso, el no incluir a la bomba de aceite térmico se debe al hecho que el fallo del mismo, conduciría, como en los casos anteriores a otra clase de evento no deseado.

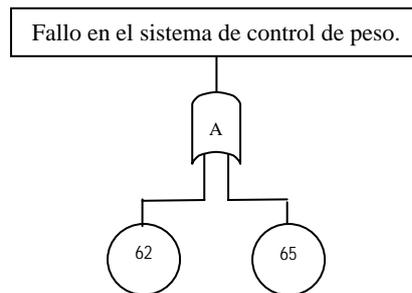


Figura AII.4 Árbol de fallo para el sistema de control de peso.  
Evento tope "Producto fuera de especificación (F/E)".  
Fuente: Autor.

Los componentes involucrados, en este sistema son los siguientes:

Número	Componente y evento representado
62	Bomba de descarga del rector 1 Fallo.
65	Sensor e indicador de Peso del R1 Fallo.

Tabla 4. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de control de peso.  
Evento tope "Producto Fuera de especificación".

### *Árbol de fallo del sistema de agitación.*

El evento tope por material fuera de especificación, producido por un fallo en el sistema de agitación; se requeriría fallo en el sistema de control o fallo en el sistema mecánico del mismo. Estos no corresponden a que el agitador se detenga, sino a enviar una señal errónea de salida. El evento fallo en el motor

del agitador, no se incluye, ya que este supondría que se detuviera lo que lleva a otro evento tope.

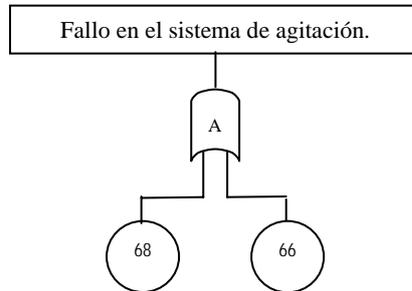


Figura All.5 Árbol de fallo para el sistema de control de agitación.  
Evento tope "Producto fuera de especificación (F/E)".  
Fuente: Autor.

Número	Componente y evento representado
66	Sistema de Control Fallo.
67	Sensor de RPM's del agitador Fallo.

Tabla 5. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de control de agitación.  
Evento tope "Producto Fuera de especificación".

b) *Árboles de fallo que representan a los subsistemas involucrados en el evento tope "Paro de Planta".*

*Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.*

Para que el fallo en el sistema de enfriamiento se lleve a cabo, debe ocurrir un fallo total en los elementos que lo constituyen, Un fallo total se refiere a la interrupción de la operación normal del servicio por un tiempo considerable e inclusive que el componente deba ser sustituido.

En la construcción de este árbol de fallo, se incluye a la bomba de alimentación así como a las válvulas de suministro-retorno relacionadas a dicha bomba, los sistemas de control, neumática y actuador. No se incluye como fallo un eventual en las válvulas de drenado, ya que la experiencia nos dice que un fallo en las mismas no es tan grave como para provocar un paro de planta.

Al fallar el sistema de enfriamiento, básicamente lo que se produce es una reacción exotérmica incontrolada (Run-away). Debido a ello, el evento tope "Fallo en el sistema de enfriamiento" lleva inmediatamente la leyenda "Run Away de la reacción", que es lo que físicamente sucede en el proceso.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
1	Válvula de acceso de agua de Torre A proceso. (Fallo)	13	Válvula Bypass de la neumática. Fallo
3	Válvula de alimentación de la línea A la bba recirculación R-1 (Fallo)	14	Válvula check. Fallo.
4	Válvula salida de Bba Recirculación Del R1 (Fallo)	15	Bomba de recirculación. Fallo.
5	Válvula de globo. Acceso a Bypass Fallo.	16	Sensor e indicador de Temperatura Fallo.
7	Válvula a la salida del By pass Fallo.	19	Actuador
11	Válvula de acceso a Neumática Fallo.	20	Neumática.
12	Válvula a la salida de la Neumática Fallo.		

Tabla 6. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.  
Evento tope "Paro de Planta".

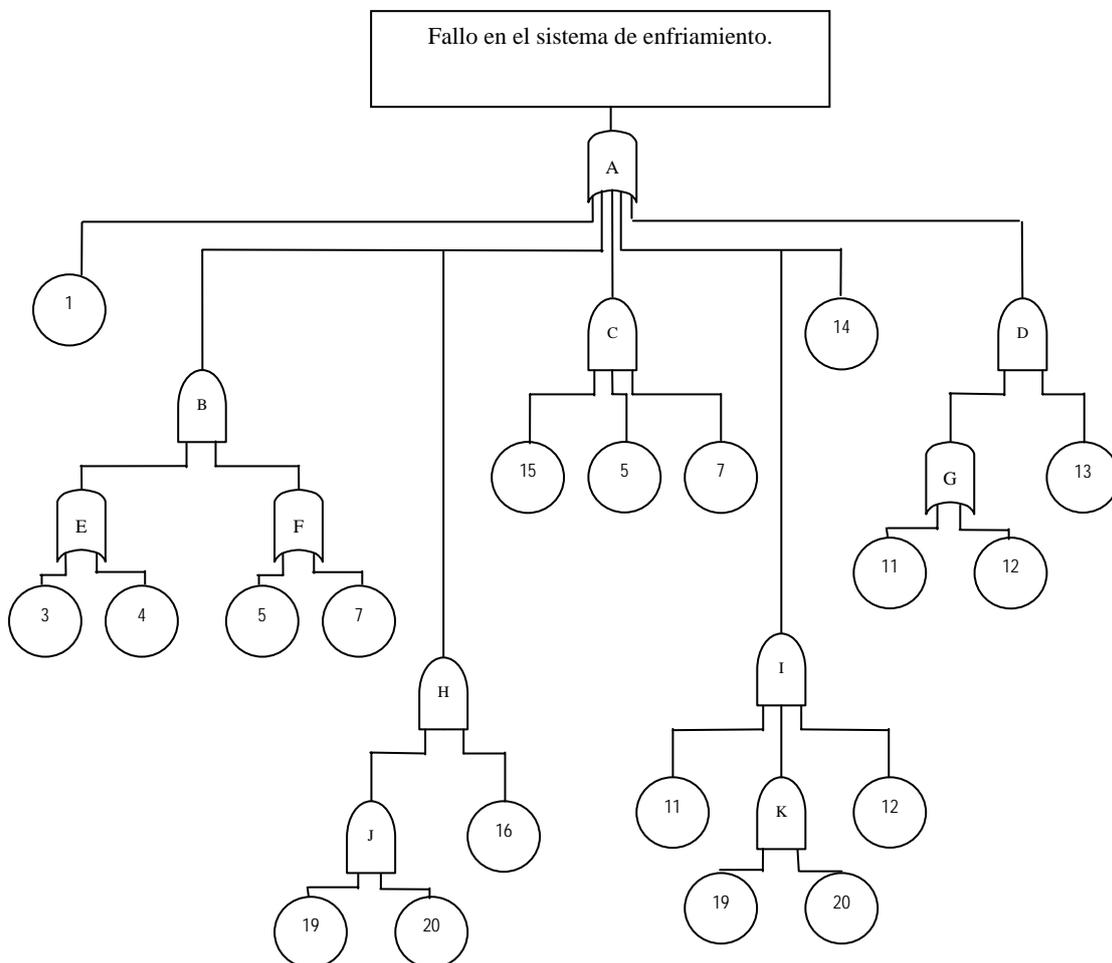


Figura AII.6 Árbol de fallo para el sistema de enfriamiento.  
Evento tope "Paro de planta"  
Fuente: Autor.

**Árbol de fallo para el sistema de alimentación.**

El evento tope en este árbol de fallo, es nuevamente, el “Run away” de la reacción, debido al fallo de los componentes que provocarían la pérdida total o parcial de alguna o todas las corrientes de alimentación. Por otro lado, también puede incluirse como evento tope la “muerte de la reacción” por una cantidad excesiva de alimentación. Esto último, y aunque con menor probabilidad de ocurrencia, también se incluye en el evento de fallo del sistema de alimentación.

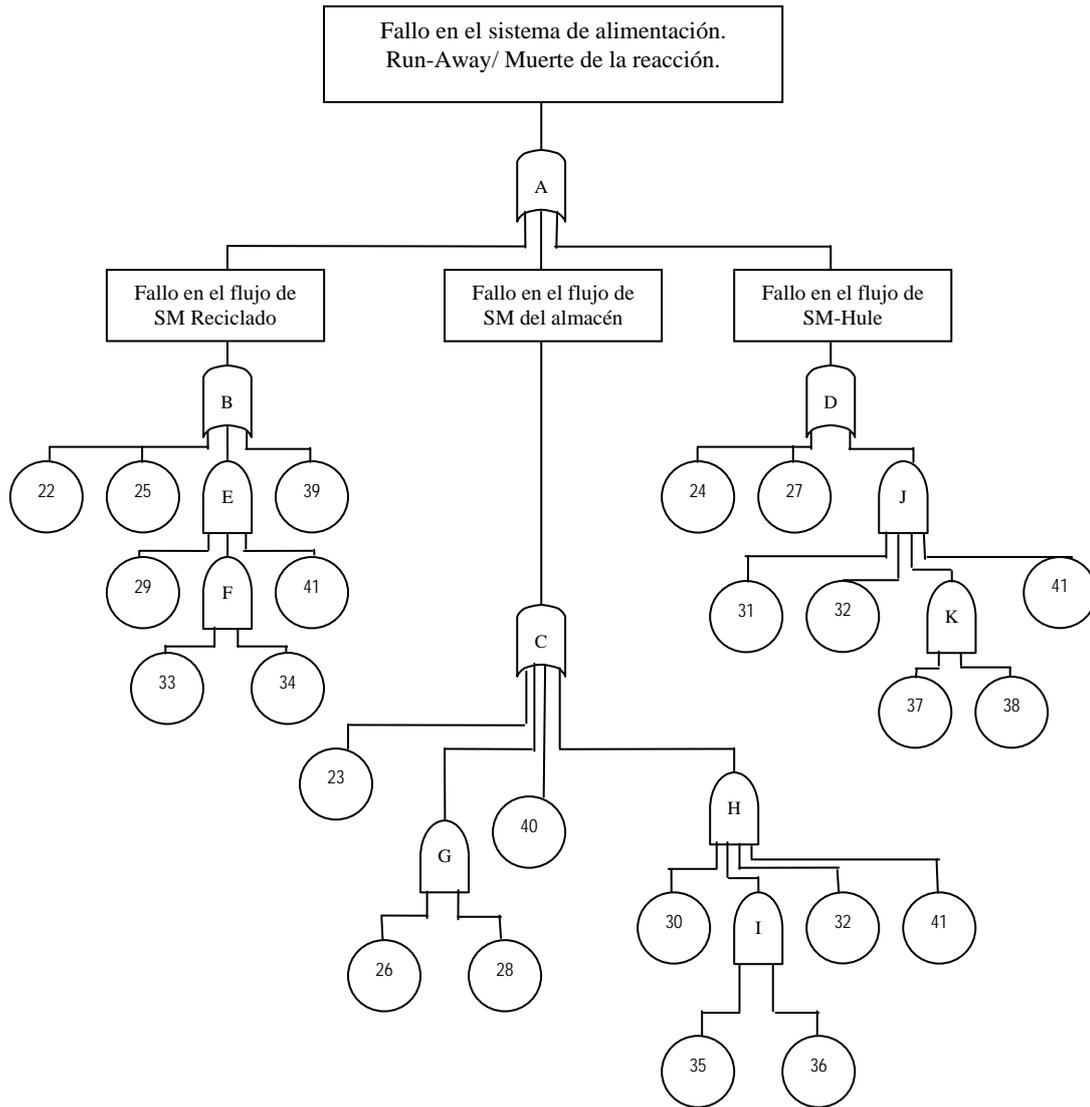


Figura AII.7 Árbol de fallo para el sistema de alimentación.  
 Evento tope “Paro de planta”.  
 Fuente: Autor.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
22	Bomba Alimentación Reciclo. (Fallo)	32	Relacionador Hule-Sm (Fallo)

23	Bomba alimentación SM-Almacén (Fallo)	33	Actuador Neumática del reciclo. (Fallo)
24	Bomba alimentación SM-Hule (Fallo)	34	Neumática del Reciclo. (Fallo)
25	Válvula Reciclo hacia mezclador. (Fallo)	35	Actuador de la Neumática Reciclo. (Fallo)
26	Válvula SM-Almacén hacia derivación. (Fallo)	36	Neumática SM-Fresco. (Fallo)
27	Válvula SM-Hule hacia el mezclador. (Fallo)	37	Actuador Neumática hule. (Fallo)
28	Válvula SM-almacén al mezclador (Fallo)	38	Neumática Hule (Fallo)
29	Sensor y transmisor de flujo SM-Reciclo (Fallo)	39	Válvula Check Reciclo. (Fallo)
30	Sensor y transmisor de flujo SM-Almacén a proceso (Fallo)	40	Válvula check SM-almacén. (Fallo)
31	Sensor y transmisor de flujo SM-Hule (Fallo)	41	Sistema de control (Fallo)

Tabla 7. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de alimentación.  
Evento tope "Paro de Planta".

### *Árbol de fallo para el sistema de precalentador.*

Nuevamente, en este sistema nos encontramos que el fallo en los componentes nos lleva al evento tope de reacción descontrolada (Run Away) o muerte de la reacción. La discusión sobre la inclusión o no de este sistema fue la más amplia y varios sectores aconsejaron no incluirlo, empero y pese a ser recomendado por una fracción minoritaria, el sistema si posee un peso específico razón por el que fue incluido.

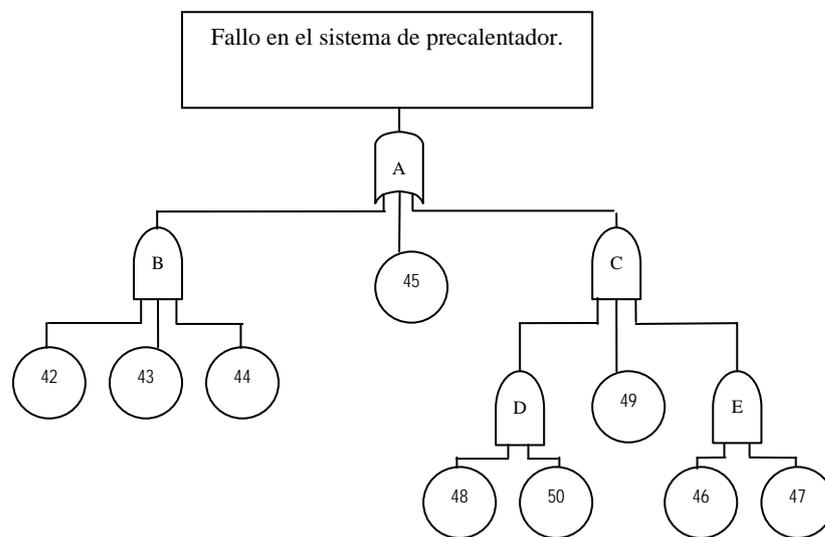


Figura AII.8 Árbol de fallo para el sistema de precalentador.  
Evento tope "Paro de planta".  
Fuente: Autor.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
43	Válvula de cabezal de vapor. (Fallo)	47	Actuador de neumática. (Fallo)
44	Válvula a derivación. (Fallo)	48	Sistema de Control. (Fallo)
45	Válvula de entrada a precalentador. (Fallo)	49	Sensor de temperatura de vapor. (Fallo)
46	Neumática de control de vapor. (Fallo)	50	Sensor de temperatura de reactor. (Fallo)

Tabla 8. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de precalentador.  
Evento tope "Paro de Planta".

### Árbol de fallo para el sistema de iniciador.

En este árbol de fallo, el evento tope es una reacción incontrolada por alimentar una cantidad en exceso de iniciador. La muerte de la reacción, por alimentar una cantidad menor de iniciador, es, de acuerdo a la información, poco probable además de evitable.

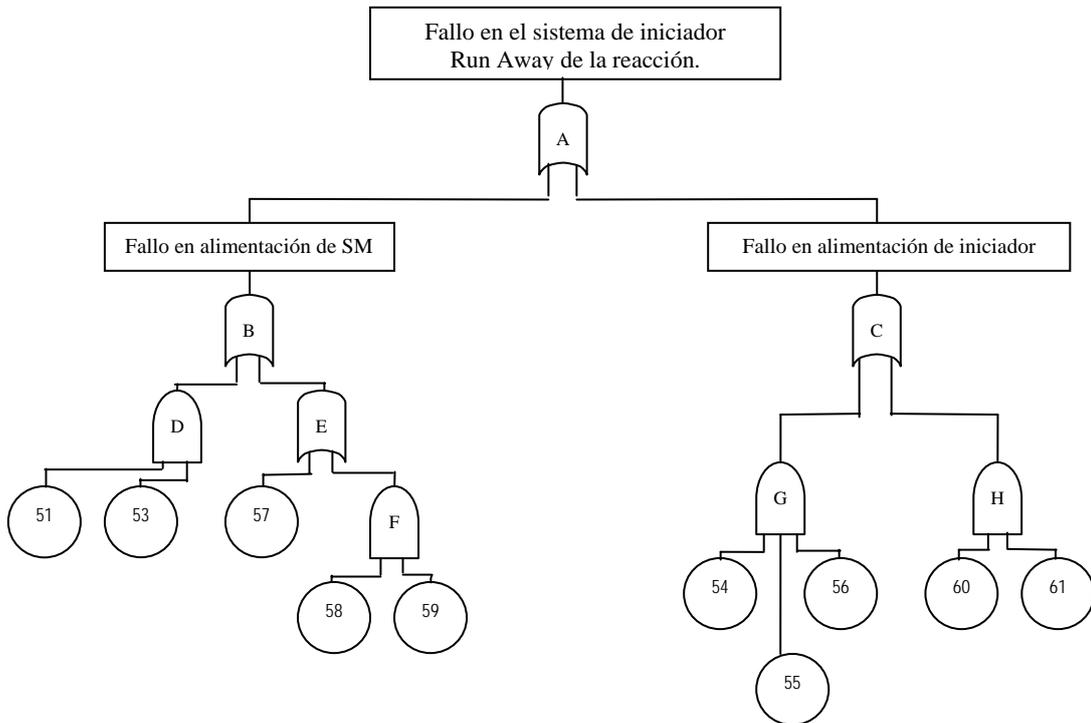


Figura AII.9 Árbol de fallo para el sistema de iniciador.  
Evento tope "Paro de planta".  
Fuente: Autor.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
51	Válvula SM desde almacén hasta La línea de catalizador (Fallo)	57	Sensor y transmisor de flujo. (Fallo)
53	Válvula de SM a la salida de la línea. (Fallo)	58	Actuador de la neumática de catalizador. (Fallo)
54	Válvula a la salida del tanque. (Fallo)	59	Válvula neumática de flujo de. Catalizador (Fallo)
55	Válvula a la salida de la bomba. (Fallo)	60	Bba flujo de catalizador. (Fallo)
56	Válvula Check (Fallo)	61	Sistema de control. (Fallo)

Tabla 9. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de catalizador.  
Evento tope "Paro de Planta".

### Árbol de fallo para el sistema de control de peso.

El paro en la bomba de descarga ocasiona el fallo en el sistema de control de peso, el paro de dicha bomba, se debe a factores tales como fallo mecánico, fallo en las señales o en el control de temperatura.

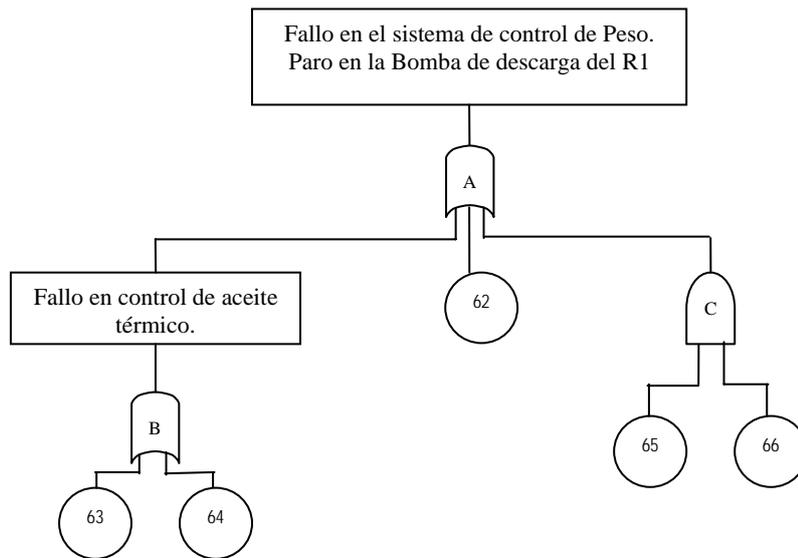


Figura AII.10 Árbol de fallo para el sistema de control de peso.  
Evento tope "Paro de planta".  
Fuente: Autor.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
62	Bomba de descarga del reactor 1. (Fallo mecánico)	65	Sensor e indicador de peso Del R1 (Fallo)
63	Bomba de aceite térmico. (Fallo mecánico)	66	Sistema de control. (Fallo)
64	Sensor de la temperatura de aceite Térmico.(Fallo)		

Tabla 10. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de control de peso.  
Evento tope "Paro de Planta".

### Árbol de fallo para el sistema de agitación.

Un paro en el agitador del reactor desencadena inevitablemente un paro de planta, ya que se genera una reacción exotérmica sumamente rápida. Quizá, el hecho que este sistema cuente con pocos elementos da la apariencia de no influir sobremanera en el evento tope característico; el análisis cuantitativo que se haga aceptará o rechazará dicha hipótesis.

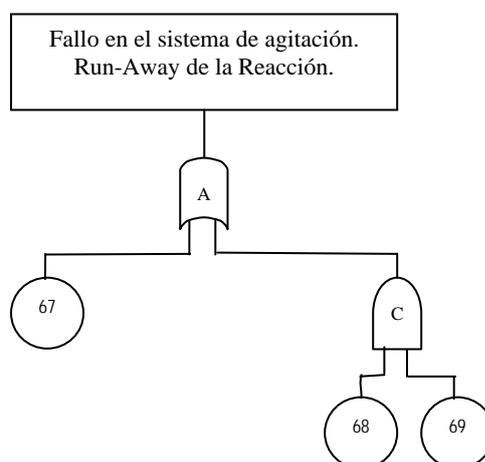


Figura AII.11 Árbol de fallo para el sistema de agitación.  
Evento tope "Paro de planta".  
Fuente: Autor.

Número	Componente y evento representado	Número	Componente y evento representado
67	Sistema de control. (Fallo)	69	Sensor de RPM's (Fallo)
68	Motor del agitador. (Fallo)		

Tabla 11. Eventos básicos del árbol de fallo para el sistema de agitación.  
Evento tope "Paro de Planta".

### Apéndice III

#### TASAS DE FALLA DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.

En las siguientes tablas, se presentan las tasas de fallo para los sistemas a estudiar, recopiladas de diversos bancos de datos empleadas en los cálculos de confiabilidad.

##### *Sistema de Enfriamiento.*

No. de Componente	Tasa de Fallo Fallos/Día	Tasa de Fallo Fallos/Año	Fuente
1	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	United Kingdom Atomic Energy Establishment
3	$1 \times 10^{-4}$	0.036500	WASH 1400
4	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	United Kingdom Atomic Energy Establishment
5	$1 \times 10^{-4}$	0.036500	WASH 1400
7	$1 \times 10^{-4}$	0.036500	WASH 1400
9	$1 \times 10^{-4}$	0.036500	WASH 1400
10	$1 \times 10^{-4}$	0.036500	WASH 1400
11	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	United Kingdom Atomic Energy Establishment
12	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	United Kingdom Atomic Energy Establishment
13	$1 \times 10^{-4}$	0.036500	WASH 1400
14	$7.20 \times 10^{-6}$	0.002628	WASH 1400
15	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
16	$5.76 \times 10^{-5}$	0.021024	OREDA-92
19	$2.59 \times 10^{-5}$	0.009453	OREADA-92
20	$1 \times 10^{-3}$	0.365000	WASH 1400
22	$3.83 \times 10^{-4}$	0.139795	Instrumental Maintenance at Large Plants

##### *Sistema de Alimentación.*

No. de Componente	Tasa de Fallo Fallos/ Día	Tasa de Fallo Fallos/Año	Fuente
22	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
23	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
24	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
25	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
26	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
27	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
28	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
29	$4.08 \times 10^{-4}$	0.148920	OREDA-92
30	$4.08 \times 10^{-4}$	0.148920	OREDA-92
31	$4.08 \times 10^{-4}$	0.148920	OREDA-92
32	$3.83 \times 10^{-4}$	0.139795	Instrumental Maintenance At Large Plants

33	$2.84 \times 10^{-4}$	0.103660	OREDA-92
34	$2.74 \times 10^{-6}$	0.001000	Instrumental Maintenance At Large Plants
35	$2.48 \times 10^{-4}$	0.090520	OREDA-92
36	$2.74 \times 10^{-6}$	0.001000	Instrumenta Maintenance At Large Plants
37	$2.48 \times 10^{-4}$	0.090520	OREDA-92
38	$2.74 \times 10^{-6}$	0.001000	Instrumental Maintenace At Large Plants
39	$7.20 \times 10^{-6}$	0.002628	OREDA-92
40	$7.20 \times 10^{-6}$	0.002628	OREDA-92
41	$3.83 \times 10^{-4}$	0.139796	Instrumental Maintenace At Large Plants

*Sistema de Precaentador:*

No. de Componente	Tasa de fallo Fallos/día	Tasa de Fallo Fallos/año	Fuente
42	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
43	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
44	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
45	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
46	$1 \times 10^{-3}$	0.401500	Instrumental Maintenance At Large Plants
47	$2.48 \times 10^{-4}$	0.090520	OREDA-92
48	$3.83 \times 10^{-4}$	0.139795	OREDA-92
49	$5.76 \times 10^{-4}$	0.210240	OREDA-92
50	$5.76 \times 10^{-4}$	0.210240	OREDA-92

*Sistema de Catalizador:*

No. de Componente	Tasa de fallo Fallos/día	Tasa de Fallo Fallos/Año	Fuente
51	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
53	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
54	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
55	$7.12 \times 10^{-5}$	0.025988	WASH 1400
56	$7.20 \times 10^{-6}$	0.025988	WASH 1400
57	$4.08 \times 10^{-4}$	0.148920	OREDA-92
58	$2.48 \times 10^{-4}$	0.090520	OREDA-92
59	$2.74 \times 10^{-6}$	0.001000	Instrumental Maintenance At Large Plants
60	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
61	$3.83 \times 10^{-4}$	0.139795	Instrumental Maintenance at Large Plants

*Sistema de Control de Peso:*

<b>No. de Componente</b>	<b>Tasa de Fallo Fallos/día</b>	<b>Tasa de fallo Fallos/año</b>	<b>Fuente</b>
62	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
63	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
64	$5.76 \times 10^{-5}$	0.021024	OREDA-92
65	$1.88 \times 10^{-4}$	0.068620	Instrumental Maintenance At Large Plants
66	$3.84 \times 10^{-4}$	0.140160	Instrumental Maintenance At Large Plants

*Sistema de agitación:*

<b>No. de Componente</b>	<b>Tasa de Fallo Fallos/día</b>	<b>Tasa de fallo Fallos/año</b>	<b>Fuente</b>
66	$3.83 \times 10^{-4}$	0.141620	Instrumental Maintenance At Large Plants
67	$1.21 \times 10^{-4}$	0.044165	Instrumental Maintenance At Large Plants
68	$7.20 \times 10^{-4}$	0.262800	WASH 1400
69	$1.21 \times 10^{-4}$	0.044165	Instrumental Maintenance At Large Plants

## Apéndice IV

Cálculo de Disponibilidad Para Los Sistemas En Estudio.

### Caso I. Evento tope: Producto Fuera De Especificación (F/E).

*Sistema de agua de enfriamiento.*

*Árbol de fallo: Figura 1, apéndice II, página 94*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 104*

Cálculo de la compuerta “B”. (Tipo AND)

$$\begin{aligned}Q(B) &= \Pr(B) = \Pr(3) \cap \Pr(9) \cap \Pr(10) \\ \Pr(B) &= (0.036500) \cdot (0.036500) \cdot (0.036500) \\ \Pr(B) &= 0.000048\end{aligned}$$

Cálculo de la compuerta “C”. (Tipo OR)

$$\begin{aligned}Q(C) &= \Pr(C) = \Pr(19) + \Pr(20) - \Pr(19) \Pr(20) \\ \Pr(C) &= 0.009453 + 0.365000 - (0.009453) \cdot (0.365000) \\ \Pr(C) &= 0.371002\end{aligned}$$

Cálculo de la compuerta “D”. (Tipo OR)

$$\begin{aligned}Q(D) &= \Pr(D) = \Pr(11) + \Pr(12) + \Pr(13) - \Pr(11) \cdot \Pr(12) - \Pr(12) \Pr(13) - \Pr(11) \Pr(13) + \Pr(11) \Pr(12) \Pr(13) \\ \Pr(D) &= 0.025988 + 0.025988 + 0.036500 - (0.025988) \cdot (0.025988) - (0.025988) \cdot (0.036500) - \\ &\quad (0.036500) \cdot (0.025988) + (0.025988) \cdot (0.025988) \cdot (0.025988) \\ \Pr(D) &= 0.085928\end{aligned}$$

Cálculo para el evento tope; compuerta “A”. (Tipo OR)

$$\begin{aligned}Q(A) &= 1 - [\Pr(\bar{16}) \cap \Pr(\bar{B}) \cap \Pr(\bar{22}) \cap \Pr(\bar{14}) \cap \Pr(\bar{C}) \Pr(\bar{D})] \\ Q(A) &= 1 - [(0.978976) \cdot (0.999952) \cdot (0.860205) \cdot (0.997372) \cdot (0.628998) \cdot (0.914072)] \\ Q(A) &= 0.517119\end{aligned}$$

Finalmente:

$$\begin{aligned}\text{Disponibilidad A(SE)} &= 1 - Q(S) \\ &= 1 - 0.517119 \\ &= \mathbf{0.482881}\end{aligned}$$

*Sistema de alimentación*

*Árbol de fallo: Figura 2, apéndice II, página 95.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 104.*

Cálculo para la compuerta “E”. (Tipo OR)

$$\begin{aligned}\Pr(E) &= (0.103660) + (0.001000) - (0.103660) \cdot (0.001000) \\ &= 0.104556\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “F”. (Tipo OR)

$$\begin{aligned}\Pr(F) &= (0.090520) + (0.001000) - (0.090520) \cdot (0.001000) \\ &= 0.091429\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “G”. (Tipo OR)

$$\begin{aligned}\Pr(G) &= (0.090520) + (0.001000) - (0.090520) \cdot (0.001000) \\ &= 0.091429\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “B” (Tipo OR)

$$\begin{aligned}\Pr(B) &= 1 - [(1 - \Pr(29)) \cdot (1 - \Pr(E)) \cdot (1 - \Pr(39))] \\ &= 1 - [(1 - 0.148920) \cdot (1 - 0.104556) \cdot (1 - 0.002628)] \\ &= 1 - [(0.851080) \cdot (0.895444) \cdot (0.997372)] \\ &= 1 - 0.760091 \\ &= 0.239908\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “C” (Tipo OR)

$$\begin{aligned}\Pr(C) &= 1 - [(1 - \Pr(30)) \cdot (1 - \Pr(F)) \cdot (1 - \Pr(40))] \\ &= 1 - [(1 - 0.148920) \cdot (1 - 0.091429) \cdot (1 - 0.002628)] \\ &= 1 - [0.851080 \cdot 0.908571 \cdot 0.997372] \\ &= 1 - 0.771234 \\ &= 0.228765\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “D” (Tipo OR)

$$\begin{aligned}\Pr(D) &= 1 - [(1 - \Pr(31)) \cdot (1 - \Pr(D)) \cdot (1 - \Pr(42))] \\ &= 1 - [(1 - 0.148920) \cdot (1 - 0.091429) \cdot (1 - 0.139795)] \\ &= 1 - [0.851080 \cdot 0.908571 \cdot 0.860205] \\ &= 1 - 0.665167 \\ &= 0.334832\end{aligned}$$

Cálculo para el evento tope; Compuerta “A” (Tipo OR).

$$\begin{aligned}
Q(A) &= \Pr(A) = 1 - [(1 - \Pr(B)) \cdot (1 - \Pr(C)) \cdot (1 - \Pr(D)) \cdot (1 - \Pr(41))] \\
&= 1 - [(1 - 0.228765) \cdot (1 - 0.239908) \cdot (1 - 0.334832) \cdot (1 - 0.139796)] \\
&= 1 - [0.771235 \cdot 0.760092 \cdot 0.665168 \cdot 0.860204] \\
&= 1 - 0.335417 \\
&= 0.664582
\end{aligned}$$

De donde, disponibilidad del sistema de alimentación:

$$A(SA) = 0.335417$$

*Sistema de Iniciador.*

*Árbol de fallo: Figura 3, apéndice II, página 95.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 105.*

Cálculo para la compuerta “B” (Tipo OR)

$$\begin{aligned}
\Pr(B) &= \Pr(58) + \Pr(59) - \Pr(58) \Pr(59) \\
&= 0.090520 + 0.001000 - (0.090520) \cdot (0.001000) \\
&= 0.091429
\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “C” (Tipo OR)

$$\begin{aligned}
\Pr(C) &= \Pr(60) + \Pr(61) - \Pr(60) \Pr(61) \\
&= 0.262800 + 0.139795 - (0.262800) \cdot (0.139795) \\
&= 0.365856
\end{aligned}$$

Cálculo para el evento tope, compuerta “A” (Tipo OR)

$$\begin{aligned}
Q(A) &= 1 - [(1 - \Pr(53)) \cdot (1 - \Pr(55)) \cdot (1 - \Pr(56)) \cdot (1 - \Pr(B)) \cdot (1 - \Pr(57)) \cdot (1 - \Pr(C))] \\
&= 1 - [(1 - 0.025988) \cdot (1 - 0.025988) \cdot (1 - 0.025988) \cdot (1 - 0.148920) \cdot (1 - 0.091429) \cdot (1 - 0.365856)] \\
&= 1 - [(0.974012) \cdot (0.974012) \cdot (0.974012) \cdot (0.851080) \cdot (0.908571) \cdot (0.634144)] \\
&= 1 - 0.453116 \\
&= 0.546883
\end{aligned}$$

De donde: Disponibilidad del sistema de catalizador:

$$A(SI) = 0.453116$$

*Sistema de control de peso.*

*Árbol de fallo: Figura 4, apéndice II, página 96*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 106*

En este caso, el evento tope se evalúa al evaluar la compuerta “A”, Tipo “OR”

$$\begin{aligned} Q(A) &= \text{Pr}(62) + \text{Pr}(65) - \text{Pr}(62)\text{Pr}(65) \\ &= 0.262800 + 0.068620 - (0.262800)(0.068620) \\ &= 0.313386 \end{aligned}$$

Donde la disponibilidad para este sistema es:

$$\mathbf{A(SP)= 0.686614}$$

*Sistema de agitación.*

*Árbol de fallo: figura 5, apéndice II, página 97.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 106.*

Nuevamente, al evaluar la única compuerta, tenemos el evento tope de este sistema:

$$\begin{aligned} Q(A) &= \text{Pr}(66) + \text{Pr}(68) - \text{Pr}(66)\text{Pr}(68) \\ &= 0.141620 + 0.262800 - (0.141620)(0.262800) \\ &= 0.367202 \end{aligned}$$

Donde la disponibilidad para este sistema es:

$$\mathbf{A(SG)= 0.632798}$$

Finalmente, evaluamos la disponibilidad del sistema en conjunto, es decir para el evento tope “Producto Fuera de Especificación” (PFE). Como referencia al árbol de fallo véase la figura 2.8 página 32.

$$\begin{aligned} Q(PFE) &= 1 - [(1 - \text{Pr}(SE)) \cdot (1 - \text{Pr}(SI)) \cdot (1 - \text{Pr}(SG)) \cdot (1 - \text{Pr}(SP)) \cdot (1 - \text{Pr}(SA))] \\ &= 1 - [(1 - 0.517119) \cdot (1 - 0.546883) \cdot (1 - 0.367202) \cdot (1 - 0.313386) \cdot (1 - 0.664582)] \\ &= 1 - [(0.482881) \cdot (0.453117) \cdot (0.632798) \cdot (0.686614) \cdot (0.335418)] \\ &= 1 - 0.031887 \\ &= 0.968112 \end{aligned}$$

De Donde  $A(PFE) = 0.031887$

## **Caso II. Evento tope: Paro De Planta (PP).**

*Sistema de agua de enfriamiento.*

*Árbol de fallo: Figura 6, apéndice II, página 98.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 104.*

Cálculo de la compuerta “E”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}\Pr(E) &= \Pr(3) + \Pr(4) - \Pr(3)\Pr(4) \\ &= 0.036500 + 0.025988 - (0.036500) \cdot (0.025988) \\ &= 0.061539\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “F”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}\Pr(F) &= \Pr(5) + \Pr(7) - \Pr(5)\Pr(7) \\ &= 0.036500 + 0.036500 - (0.036500) \cdot (0.036500) \\ &= 0.071667\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “B”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(B) &= \Pr(E)\Pr(F) \\ &= (0.061539) \cdot (0.071667) \\ &= 0.004410\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “J”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(J) &= \Pr(19)\Pr(20) \\ &= (0.009453)(0.365000) \\ &= 0.003450\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “K”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(K) &= \Pr(19)\Pr(20) \\ &= (0.009453) \cdot (0.365000) \\ &= 0.003450\end{aligned}$$

Cálculo para la Compuerta “H”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(H) &= \Pr(J)\Pr(16) \\ &= (0.003450)(0.021024) \\ &= 0.000072\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “I”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(I) &= \Pr(11)\Pr(K)\Pr(12) \\ &= (0.025988)(0.003450)(0.025988) \\ &= 0.000002\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “G”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}\Pr(G) &= \Pr(11) + \Pr(12) - \Pr(11) \Pr(12) \\ &= (0.025988) + (0.025988) - (0.025988)(0.025988) \\ &= 0.051300\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “C”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(C) &= \Pr(16) \Pr(5) \Pr(7) \\ &= (0.021024)(0.036500)(0.036500) \\ &= 0.000028\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “D”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(D) &= \Pr(G) \Pr(13) \\ &= (0.051300)(0.036500) \\ &= 0.001872\end{aligned}$$

Finalmente, el cálculo para el evento tope el cual se evalúa a través de la compuerta “A”, la cual es una tipo “OR”:

$$\begin{aligned}Q(SE) = \Pr(A) &= 1 - [(1 - \Pr(1))(1 - \Pr(B))(1 - \Pr(14))(1 - \Pr(C))(1 - \Pr(D))] \\ &= 1 - [(1 - 0.025988)(1 - 0.004410)(1 - 0.002628)(1 - 0.000028)(1 - 0.001872)] \\ &= 1 - [(0.974012)(0.995590)(0.997372)(0.999972)(0.998128)] \\ &= 1 - (0.965330) \\ &= 0.034669\end{aligned}$$

De donde:

$$A(SE) = 0.965330$$

*Sistema de alimentación.*

*Árbol de fallo: Figura 7, apéndice II, página 99.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 104.*

Cálculo para la compuerta “F”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(F) &= \Pr(33) \Pr(34) \\ &= (0.103660)(0.001000) \\ &= 0.000103\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “E”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(E) &= \Pr(29) \Pr(F) \Pr(41) \\ &= (0.148920)(0.000103)(0.139796) \\ &= 0.000002\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “B”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}\Pr(B) &= 1 - [(1 - \Pr(22))(1 - \Pr(26))(1 - \Pr(E))(1 - \Pr(39))] \\ &= 1 - [(1 - 0.262800)(1 - 0.025988)(1 - 0.000002)(1 - 0.002628)] \\ &= 1 - [(0.737200)(0.974012)(0.999998)(0.997372)] \\ &= 1 - (0.716153) \\ &= 0.283846\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “G”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(G) &= \Pr(26) \Pr(28) \\ &= (0.025988)(0.025988) \\ &= 0.000675\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “I”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(I) &= \Pr(35) \Pr(36) \\ &= (0.090520)(0.001000) \\ &= 0.000090\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “H”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}\Pr(H) &= \Pr(30) \Pr(I) \Pr(32) \Pr(41) \\ &= (0.148920)(0.000090)(0.139795)(0.139796) \\ &= 2.62 \times 10^{-7}\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “C”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}\Pr(C) &= 1 - [(1 - \Pr(23))(1 - \Pr(G))(1 - \Pr(40))(1 - \Pr(H))] \\ &= 1 - [(1 - 0.262800)(1 - 0.000675)(1 - 0.002628)(1 - 2.62 \times 10^{-7})] \\ &= 1 - (0.734766) \\ &= 0.265234\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “K”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(k) &= \Pr(37) \Pr(38) \\
&= (0.090520)(0.001000) \\
&= 0.000090
\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “J”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(J) &= \Pr(31) \Pr(32) \Pr(K) \Pr(41) \\
&= (0.148920)(0.139796)(0.000090)(0.139796) \\
&= 2.62 \times 10^{-7}
\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “D”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
\Pr(D) &= 1 - [(1 - \Pr(24))(1 - \Pr(27))(1 - \Pr(J))] \\
&= 1 - [(1 - 0.262800)(1 - 0.025988)(1 - 2.62 \times 10^{-7})] \\
&= 1 - [(0.737200)(0.974012)(0.999999)] \\
&= 1 - (0.718040) \\
&= 0.281959
\end{aligned}$$

Finalmente, evaluando el evento tope el cual se realiza a través de la compuerta “A”; del Tipo OR:

$$\begin{aligned}
Q(SA) = \Pr(A) &= 1 - [(1 - \Pr(B))(1 - \Pr(C))(1 - \Pr(D))] \\
&= 1 - [(1 - 0.283846)(1 - 0.265234)(1 - 0.281959)] \\
&= 1 - [(0.716154)(0.734766)(0.718041)] \\
&= 1 - 0.716153 \\
&= 0.283846
\end{aligned}$$

De donde; A(SA)= 0.716153

*Sistema de Precaentador.*

*Árbol de fallo: figura 8, apéndice II, página 100.*

*Tasas de fallo: Apéndice III, página 105.*

Cálculo para la compuerta “B”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(B) &= \Pr(42) \Pr(43) \Pr(44) \\
&= (0.025988)(0.025988)(0.025988) \\
&= 0.000017
\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “D”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(D) &= \Pr(48) \Pr(50) \\
&= (0.139795) \cdot (0.210240) \\
&= 0.029390
\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “E”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(E) &= \Pr(46) \Pr(47) \\
&= (0.401500)(0.090520) \\
&= 0.036343
\end{aligned}$$

Cálculo para la compuerta “C”, Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(C) &= \Pr(D) \Pr(49) \Pr(E) \\
&= (0.029390)(0.910240)(0.036343) \\
&= 0.000224
\end{aligned}$$

Evaluando el evento tope, el cuál se calcula evaluando la compuerta “A”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
Q(SPC) = \Pr(A) &= 1 - [(1 - \Pr(B))(1 - \Pr(45))(1 - \Pr(C))] \\
&= 1 - [(1 - 0.000017)(1 - 0.025988)(1 - 0.000224)] \\
&= 1 - [(0.999983)(0.974012)(0.999776)] \\
&= 1 - (0.973777) \\
&= 0.026222
\end{aligned}$$

De donde la disponibilidad para este sistema;  $A(SPC) = 0.973777$

*Sistema de Iniciador.*

*Árbol de fallo: Figura 9, apéndice II, página 101.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 105.*

Calculando la compuerta “F”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(F) &= \Pr(58) \Pr(59) \\
&= (0.090520)(0.001000) \\
&= 0.000090
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “G”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(F) &= \Pr(54) \Pr(55) \Pr(56) \\
&= (0.025988)(0.025988)(0.025988) \\
&= 0.000017
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “H”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(H) &= \Pr(60) \Pr(61) \\
&= (0.262800)(0.139795) \\
&= 0.036738
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “D”; Tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(D) &= \Pr(51) \Pr(53) \\
&= (0.025988)(0.025988) \\
&= 0.000675
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “E”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
\Pr(E) &= 1 - [(1 - \Pr(57))(1 - \Pr(F))] \\
&= 1 - [(1 - 0.148920)(1 - 0.000090)] \\
&= 1 - [(0.851080)(0.999910)] \\
&= 1 - (0.851003) \\
&= 0.148996
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “B”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
\Pr(B) &= \Pr(D) + \Pr(E) - \Pr(D) \Pr(E) \\
&= (0.000675) + (0.148996) - ((0.000675)(0.148996)) \\
&= 0.149570
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “C”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
\Pr(C) &= \Pr(G) + \Pr(H) - \Pr(G) \Pr(H) \\
&= (0.000017) + (0.036738) - ((0.000017)(0.036738)) \\
&= 0.036754
\end{aligned}$$

Evaluando el evento tope, que corresponde a la compuerta “A”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
Q(SI) &= \Pr(B) + \Pr(C) - \Pr(B) \Pr(C) \\
&= (0.149570) + (0.036754) - ((0.149570)(0.036754)) \\
&= 0.180826
\end{aligned}$$

De donde la disponibilidad del sistema es:

$$A(SI) = 0.819174$$

*Sistema de Control de Peso.*

*Árbol de fallo: Figura 10, apéndice II, página 102*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 106.*

Calculando la compuerta “C”; tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(C) &= \Pr(65) \Pr(66) \\
&= (0.068620)(0.140160) \\
&= 0.009617
\end{aligned}$$

Calculando la compuerta “B”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
\Pr(B) &= \Pr(63) + \Pr(64) - \Pr(63) \Pr(64) \\
&= (0.262800) + (0.021024) - (0.262800)(0.021024) \\
&= 0.278298
\end{aligned}$$

Evaluando el evento tope, que corresponde a evaluar la compuerta “A”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
Q(SP) = \Pr(A) &= 1 - [(1 - \Pr(B)) + (1 - \Pr(62)) - (1 - \Pr(C))] \\
&= 1 - [(1 - 0.278298)(1 - 0.262800)(1 - 0.009617)] \\
&= 1 - [(0.721702)(0.737200)(0.990383)] \\
&= 1 - (0.526922) \\
&= 0.473077
\end{aligned}$$

De donde la disponibilidad de este sistema:

$$A(SP) = 0.526923$$

*Sistema de Control de Agitación.*

*Árbol de fallo: Figura 11, apéndice II, página 103.*

*Tasas de Fallo: Apéndice III, página 106.*

Calculando la compuerta “C”; tipo AND:

$$\begin{aligned}
\Pr(C) &= \Pr(68) \Pr(69) \\
&= (0.262800)(0.044165) \\
&= 0.011606
\end{aligned}$$

Evaluando el evento tope, que corresponde al cálculo de la compuerta “A”; Tipo OR:

$$\begin{aligned}
Q(SG) = \Pr(A) &= \Pr(67) + \Pr(C) - \Pr(67) \Pr(C) \\
&= (0.044165) + (0.011606) - (0.044165)(0.011606) \\
&= 0.055258
\end{aligned}$$

De donde la disponibilidad para este sistema es:

$$A(SG) = 0.944742$$

Finalmente, evaluamos la disponibilidad del sistema en conjunto, es decir para el evento tope “Paro de Planta” (PP). Véase el árbol de fallo en la figura 2.14 página 38.

$$\begin{aligned} Q(PP) &= 1 - [(1 - \text{Pr}(SE)) \cdot (1 - \text{Pr}(SA)) \cdot (1 - \text{Pr}(SPC)) \cdot (1 - \text{Pr}(SI)) \cdot (1 - \text{Pr}(SP)) \cdot (1 - \text{Pr}(SG))] \\ &= 1 - [(1 - 0.034669) \cdot (1 - 0.283846) \cdot (1 - 0.026222) \cdot (1 - 0.180826) \cdot (1 - 0.473077) \cdot (1 - 0.055258)] \\ &= 1 - [(0.965331) \cdot (0.716154) \cdot (0.973778) \cdot (0.819174) \cdot (0.526923) \cdot (0.944742)] \\ &= 1 - 0.274523 \\ &= 0.725476 \end{aligned}$$

De Donde  $A(PP) = 0.274523$

## Apéndice V

Cálculo de los conjuntos mínimos de corte.

Para realizar el cómputo de los conjuntos mínimos de corte utilizaremos la técnica MOCUS. Dicha técnica se basa en la observación en la que una compuerta OR incrementa el número de conjuntos de corte, en tanto una compuerta AND incrementa el número de elementos de cada conjunto de corte. El algoritmo MOCUS se implementa como sigue:

- 1) Alfabetice cada compuerta.
- 2) Numere cada evento básico.
- 3) Coloque la primera compuerta (perteneciente al evento tope) en la primera columna y renglón de la matriz.
- 4) Dependiendo del tipo de compuerta involucrada, se realiza lo siguiente:
  - a. Reemplace a las compuertas OR por un arreglo vertical, en la posición donde se halla dicha compuerta; esto incrementa el número de conjuntos de corte.
  - b. Reemplace a las compuertas AND por un arreglo horizontal, en la posición donde se halla dicha compuerta; esto incrementa el número de elementos para determinado conjunto de corte.
- 5) Cuando todas las compuertas hallan sido reemplazadas por eventos básicos, obtenga los conjuntos mínimos de corte eliminando los superconjuntos. Un superconjunto es aquél que está incluido en algún otro conjunto de corte.

Los primeros pasos del algoritmo ya se han implementado al realizar los árboles de fallo; los últimos pasos son implementados en este anexo. Se comienza por obtener los conjuntos mínimos de corte para el evento tope de material F/E:

Conjunto mínimo de corte para el sistema de enfriamiento.

A			
16	16	16	16
B	3 9 10	3 9 10	3 9 10
22	22	22	22
C	C	18	19
A4	14	20	20
D	D	14	14
		D	11
			12
			13

Así tenemos los siguientes conjuntos de corte:

$$\{16\}, \{3,9,10\}, \{22\}, \{19\}, \{20\}, \{14\}, \{11\}, \{12\}, \{13\}$$

*Sistema de alimentación.*

A	29	29	29	29	29
B	39	39	39	39	33 34
C	E	33 34	33 34	33 34	30
D	C	C	30	30	35
41	D	D	F	35	36
	41	41	40	36	40
			D	40	31
			41	31	37
				G	38
				32	32
				41	41

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{29\}\{33,34\}\{30\}\{35\}\{36\}\{40\}\{31\}\{37\}\{38\}\{32\}\{41\}$$

*Sistema de Iniciador.*

A	58	58	58
	55	55	55
	56	56	56
	B	58	59
	57	59	57
	C	57	60
		60	61

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{55\}\{56\}\{57\}\{58\}\{59\}\{60\}\{61\}$$

*Sistema de control de peso.*

A	62
	65

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{62\}\{65\}$$

*Sistema de agitación.*

A	66
	68

Los conjuntos de corte para este sistema son:

{66}{68}

Ahora se evalúan los conjuntos de corte para el evento tope paro de planta:

*Sistema de agua de enfriamiento.*

A	1	1	1	1
	B	E F	3 F	3 5
	H	I 16	4 F	3 7
	C	15 5 7	16 19 20	4 5
	J	11 K 12	15 5 7	4 7
	14	14	11 19 20 12	16 19 20
	D	G 13	14	15 5 7
			11 13	11 19 20 12
			11 12	14
				11 13
				11 12

Los conjuntos de corte para este sistema son:

{1}{3,5}{3,7}{4,5}{4,7}{16,19,20}{15,5,7}{11,19,20}{12}{14}{11,13}{11,12}

*Sistema de alimentación.*

A	B	22	22	22
	C	26	26	26
	D	E	29 F 41	29 33 34 41
		39	39	39
		23	23	23
	G	26 28	26 28	26 28
		40	40	40
		24	30 I 32 41	30 32 41 35 36
		27	24	24
	J	27	27	27
			31 32 K 41	31 32 37 38 41

Los conjuntos de corte para este sistema son:

{22}{26}{29,33,34,41}{39}{23}{26,28}{40}{30,32,41,35}{36}{24}{27}  
{31,32,37,38}{41}

*Sistema de Pre calentador.*

A	B	42 43 44	42 43 44
	45	45	45
	C	D 49 E	48 50 49 46 47

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{42 \ 43 \ 44\} \{45\} \{48,50,49,46,47\}$$

*Sistema de Iniciador.*

A	B	D	51 53	51 53
	C	E	57	57
		G	F	58 59
		H	54 55 56	54 55 56
			60 61	60 61

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{51,53\} \{57\} \{58,59\} \{54,55,56\} \{60,61\}$$

*Sistema de Control de Peso.*

A	B	63
	62	64
	C	62
		65 66

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{63\} \{64\} \{62\} \{65,66\}$$

*Sistema de Control de Agitación.*

A	67	67
	C	68 69

Los conjuntos de corte para este sistema son:

$$\{67\} \{68,69\}$$

## Apéndice VI

### Cálculo de valores de confiabilidad.

Las ecuaciones involucradas en el cálculo de los valores de confiabilidad, son las siguientes:

Si el conjunto de corte está formado por un solo componente, se tiene:

Número esperado de fallos por unidad de tiempo:

$$w(t) = f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad v(t) = 0$$

No Disponibilidad:

$$Q(t) = \int_0^t [w(u) - v(u)] du = \int_0^t \lambda e^{-\lambda u} du = 1 - e^{-\lambda t}$$

No confiabilidad:

$$W(0,t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda u} du = 1 - e^{-\lambda t} = F(t) = \text{No Confiabilidad}$$

Si el conjunto de corte está formado por más de un componente, La siguiente ecuación es empleada para calcular la no confiabilidad de los subsistemas y del sistema en general:

No disponibilidad (No confiabilidad):

$$Q^*(t) = \Pr(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) = \prod_{j=1}^n Q_j(t)$$

### *CASO I. EVENTO TOPE: PRODUCTO FUERA DE ESPECIFICACIÓN (F/E).*

#### **Sistema de enfriamiento.**

Árbol de fallo: apéndice II, figura 1, página 94.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 104.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 119.

Tiempo (días)	COMPONENTES							
	16		3, 9, 10 y 13		14		20	
	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.9988	0.0012	0.9980	0.0020	0.9999	0.0001	0.9802	0.0198
100	0.9943	0.0057	0.9900	0.0100	0.9993	0.0007	0.9048	0.0952
365	0.9792	0.0208	0.9642	0.0358	0.9974	0.0026	0.6942	0.3058
500	0.9716	0.0284	0.9512	0.0488	0.9964	0.0036	0.6065	0.3935
1100	0.9386	0.0614	0.8958	0.1042	0.9921	0.0079	0.3329	0.6671
2000	0.8912	0.1088	0.8187	0.1813	0.9857	0.0143	0.1353	0.8647

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	22		19		11 y 12	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9924	0.0076	0.9995	0.0005	0.9986	0.0014
100	0.9624	0.0376	0.9974	0.0026	0.9929	0.0071
365	0.8695	0.1305	0.9906	0.0094	0.9743	0.0257
500	0.8257	0.1743	0.9871	0.0129	0.965	0.035
1100	0.6562	0.3438	0.9719	0.0281	0.9247	0.0753
2000	0.4649	0.5351	0.9495	0.0505	0.8673	0.1327

CONJUNTOS DE CORTE		
Elementos: 3, 9 y 10		
Tiempo (días)	R	F
20	1.000000	0.000000
100	0.999999	0.000001
365	0.999954	0.000046
500	0.999884	0.000116
1100	0.998870	0.001130
2000	0.994044	0.005956

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO		
Tiempo (Días)	R	F
20	0.9663	0.0337
100	0.8423	0.1577
365	0.5345	0.4655
500	0.4239	0.5761
1100	0.1512	0.8488
2000	0.0321	0.9679

### Sistema de alimentación.

Árbol de fallo: apéndice II, figura II, página 95.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 104.

Conjuntos de corte: ver apéndice V, página 120.

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	39 y 40		34, 36 y 38		32 y 41	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9999	0.0001	0.9999	0.0001	0.9924	0.0076
100	0.9993	0.0007	0.9997	0.0003	0.9624	0.0376
365	0.9974	0.0026	0.9990	0.0010	0.9263	0.0737
500	0.9964	0.0036	0.9986	0.0014	0.8915	0.1085
1100	0.9921	0.0079	0.9970	0.0030	0.8695	0.1305
2000	0.9857	0.0143	0.9945	0.0055	0.8257	0.1743

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	29, 30 y 31		33		35 y 37	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9919	0.0081	0.9943	0.0057	0.9951	0.0049
100	0.9600	0.0400	0.9720	0.0280	0.9755	0.0245
365	0.8616	0.1384	0.9015	0.0985	0.9516	0.0484
500	0.8155	0.1845	0.8676	0.1324	0.9283	0.0717
1100	0.6384	0.3616	0.7317	0.2683	0.9135	0.0865
2000	0.4422	0.5578	0.5667	0.4333	0.8834	0.1166

CONJUNTOS DE CORTE		
	Elementos:33 y 34	
Tiempo (días)	R	F
20	1.0000	0.0000
100	1.0000	0.0000
365	0.9999	0.0001
500	0.9998	0.0002
1100	0.9992	0.0008
2000	0.9976	0.0024

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN		
Tiempo (días)	R	F
20	0.95112	0.04888
100	0.77834	0.22166
365	0.40062	0.59938
500	0.28561	0.71439
1100	0.06346	0.93654
2000	0.00664	0.99336

### Sistema de catalizador.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 3, página 95.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 105.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 120.

Tiempo (días)	COMPONENTES							
	58		56		57		61	
	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.9951	0.0049	0.9999	0.0001	0.9919	0.0081	0.9857	0.0143
100	0.9755	0.0245	0.9993	0.0007	0.9600	0.0400	0.9305	0.0695
365	0.9135	0.0865	0.9974	0.0026	0.8616	0.1384	0.7689	0.2311
500	0.8834	0.1166	0.9964	0.0036	0.8155	0.1845	0.6977	0.3023
1100	0.7612	0.2388	0.9921	0.0079	0.6384	0.3616	0.4529	0.5471
2000	0.6090	0.3910	0.9857	0.0143	0.4422	0.5578	0.2369	0.7631

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	55		59		60	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9986	0.0014	0.9999	0.0001	0.9919	0.0081
100	0.9929	0.0071	0.9997	0.0003	0.9600	0.0400
365	0.9743	0.0257	0.9990	0.0010	0.8616	0.1384
500	0.9650	0.0350	0.9986	0.0014	0.8155	0.1845
1100	0.9247	0.0753	0.9970	0.0030	0.6384	0.3616
2000	0.8673	0.1327	0.9945	0.0055	0.4422	0.5578

SISTEMA DE CATALIZADOR		
Tiempo (días)	R	F
20	0.9586	0.0414
100	0.8095	0.1905
365	0.4624	0.5376
500	0.3476	0.6524
1100	0.0978	0.9022
2000	0.0146	0.9854

### Sistema de control de peso.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 4, página 95.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 105.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 120.

Tiempo (días)	COMPONENTES			
	62		65	
	R	F	R	F
20	0.9857	0.0143	0.9962	0.0038
100	0.9305	0.0695	0.9814	0.0186
365	0.7689	0.2311	0.9337	0.0663
500	0.6977	0.3023	0.9103	0.0897
1100	0.4529	0.5471	0.8132	0.1868
2000	0.2369	0.7631	0.6866	0.3134

SISTEMA DE CONTROL DE PESO		
Tiempo (días)	R	F
20	0.9820	0.0180
100	0.9132	0.0868
365	0.7179	0.2821
500	0.6351	0.3649
1100	0.3683	0.6317
2000	0.1627	0.8373

## Sistema de agitación.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 5, página 97.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 106.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 120.

Tiempo (días)	COMPONENTES			
	66		68	
	R	F	R	F
20	0.9924	0.0076	0.9857	0.0143
100	0.9624	0.0376	0.9305	0.0695
365	0.8695	0.1305	0.7689	0.2311
500	0.8257	0.1743	0.6977	0.3023
1100	0.6562	0.3438	0.4529	0.5471
2000	0.4649	0.5351	0.2369	0.7631

SISTEMA DE AGITACIÓN		
Tiempo (días)	R	F
20	0.9782	0.0218
100	0.8956	0.1044
365	0.6686	0.3314
500	0.5761	0.4239
1100	0.2972	0.7028
2000	0.1101	0.8899

En Resumen:

EVENTO TOPE PRODUCTO F/E						
SISTEMA	ENFRIAMIENTO		INICIADOR		AGITACIÓN	
Tiempo (Días)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)
20	0.9663	0.0337	0.9586	0.0414	0.9782	0.0218
100	0.8423	0.1577	0.8095	0.1905	0.8956	0.1044
365	0.5345	0.4655	0.4624	0.5376	0.6686	0.3314
500	0.4239	0.5761	0.3476	0.6524	0.5761	0.4239
1100	0.1512	0.8488	0.0978	0.9022	0.2972	0.7028
2000	0.0321	0.9679	0.0146	0.9854	0.1101	0.8899

EVENTO TOPE PRODUCTO F/E				
SISTEMA	CONTROL DE PESO		ALIMENTACIÓN	
Tiempo (días)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)
20	0.9820	0.0180	0.9511	0.0489
100	0.9132	0.0868	0.7783	0.2217
365	0.7179	0.2821	0.4006	0.5994
500	0.6351	0.3649	0.2856	0.7144
1100	0.3683	0.6317	0.0635	0.9365
2000	0.1627	0.8373	0.0066	0.9934

EVENTO TOPE PRODUCTO F/E SISTEMA		
Tiempo (Días)	R(t)	F(t)
20	0.8463	0.1537
100	0.4340	0.5660
365	0.0475	0.9525
500	0.0154	0.9846
1100	0.0001	0.9999
2000	0.0000	1.0000

**CASO II. EVENTO TOPE: PRODUCTO PARO DE PLANTA.**

**Sistema de enfriamiento.**

Árbol de fallo: apéndice II, figura 6 , página 98.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 104.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 121.

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	1,4,14,12,12		16		20	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9986	0.0014	0.9988	0.0012	0.9802	0.0198
100	0.9929	0.0071	0.9943	0.0057	0.9048	0.0952
365	0.9743	0.0257	0.9792	0.0208	0.6942	0.3058
500	0.9650	0.0350	0.9716	0.0284	0.6065	0.3935
1100	0.9247	0.0753	0.9386	0.0614	0.3329	0.6671
2000	0.8673	0.1327	0.8912	0.1088	0.1353	0.8647

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	3,5,7 y 13		19		15	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9980	0.0020	0.9995	0.0005	0.9857	0.0143
100	0.9900	0.0100	0.9974	0.0026	0.9305	0.0695
365	0.9642	0.0358	0.9906	0.0094	0.7689	0.2311
500	0.9512	0.0488	0.9871	0.0129	0.6977	0.3023
1100	0.8958	0.1042	0.9719	0.0281	0.4529	0.5471
2000	0.8187	0.1813	0.9495	0.0505	0.2369	0.7631

CONJUNTOS DE CORTE								
ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN								
Tiempo (días)	3,5		4,5		11,13		3,7	
	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.999996	0.000004	0.999997	0.000003	0.999997	0.000003	0.999996	0.000004
100	0.999901	0.000099	0.999929	0.000071	0.999929	0.000071	0.999901	0.000099
365	0.998715	0.001285	0.999081	0.000919	0.999081	0.000919	0.998715	0.001285
500	0.997621	0.002379	0.998294	0.001706	0.998294	0.001706	0.997621	0.002379
1100	0.989149	0.010851	0.992153	0.007847	0.992153	0.007847	0.989149	0.010851
2000	0.967141	0.032859	0.975941	0.024059	0.975941	0.024059	0.967141	0.032859

CONJUNTOS DE CORTE								
ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN								
Tiempo (días)	4,7		16,19,20		15,5,7		11,12	
	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.999997	0.000003	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.999998	0.000002
100	0.999929	0.000071	0.999999	0.000001	0.999993	0.000007	0.999950	0.000050
365	0.999081	0.000919	0.999940	0.000060	0.999703	0.000297	0.999342	0.000658
500	0.998294	0.001706	0.999856	0.000144	0.999281	0.000719	0.998777	0.001223
1100	0.992153	0.007847	0.998850	0.001150	0.994064	0.005936	0.994325	0.005675
2000	0.975941	0.024059	0.995250	0.004750	0.974927	0.025073	0.982384	0.017616

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO		
Tiempo (días)	R(t)	F(t)
20	0.9971	0.0029
100	0.9856	0.0144
365	0.9454	0.0546
500	0.9240	0.0760
1100	0.8219	0.1781
2000	0.6604	0.3396

### Sistema de alimentación.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 7, página 99.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 104.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 121.

COMPONENTES										
Tiempo (días)	22 y 24		29, 30 y 31		41 y 32		35 y 37		26, 28 y 27	
	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.9986	0.0014	0.9943	0.0057	0.9999	0.0001	0.9951	0.0049	0.9986	0.0014
100	0.9929	0.0071	0.9720	0.0280	0.9993	0.0007	0.9755	0.0245	0.9929	0.0071
365	0.9743	0.0257	0.9015	0.0985	0.9974	0.0026	0.9135	0.0865	0.9743	0.0257
500	0.9650	0.0350	0.8676	0.1324	0.9964	0.0036	0.8834	0.1166	0.9650	0.0350
1100	0.9247	0.0753	0.7317	0.2683	0.9921	0.0079	0.7612	0.2388	0.9247	0.0753
2000	0.8673	0.1327	0.5667	0.4333	0.9857	0.0143	0.6090	0.3910	0.8673	0.1327

		COMPONENTES							
		33		39 y 40		34,36 y 38		23	
Tiempo (días)		R	F	R	F	R	F	R	F
	20		0.9943	0.0057	0.9999	0.0001	0.9999	0.0001	0.9857
100		0.9720	0.0280	0.9993	0.0007	0.9997	0.0003	0.9305	0.9305
365		0.9015	0.0985	0.9974	0.0026	0.9990	0.0010	0.7689	0.7689
500		0.8676	0.1324	0.9964	0.0036	0.9986	0.0014	0.6977	0.6977
1100		0.7317	0.2683	0.9921	0.0079	0.9970	0.0030	0.4529	0.4529
2000		0.5667	0.4333	0.9857	0.0143	0.9945	0.0055	0.2369	0.2369

		CONJUNTOS DE CORTE							
		ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN							
		29,33,34,41		30,32,35,36,41		26,28		31,32,37,38,41	
Tiempo (días)		R	F	R	F	R	F	R	F
	20		1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.999998	0.000002	1.000000
100		1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.999950	0.000050	1.000000	0.000000
365		0.999998	0.000002	1.000000	0.000000	0.999342	0.000658	1.000000	0.000000
500		0.999994	0.000006	0.999999	0.000001	0.998777	0.001223	0.999999	0.000001
1100		0.999900	0.000100	0.999969	0.000031	0.994325	0.005675	0.999969	0.000031
2000		0.999293	0.000707	0.999659	0.000341	0.982384	0.017616	0.999659	0.000341

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN		
Tiempo(Días)	R	F
20	0.97979	0.02021
100	0.90291	0.09709
365	0.68849	0.31151
500	0.59952	0.40048
1100	0.32344	0.67656
2000	0.12736	0.87264

### Sistema de iniciador.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 9, página 101.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 105.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 122.

		COMPONENTES					
		51,53,54,55,56		58		60	
Tiempo (días)		R	F	R	F	R	F
	20		0.9986	0.0014	0.9951	0.0049	0.9857
100		0.9929	0.0071	0.9755	0.0245	0.9305	0.0695
365		0.9743	0.0257	0.9135	0.0865	0.7689	0.2311
500		0.9650	0.0350	0.8834	0.1166	0.6977	0.3023
1100		0.9247	0.0753	0.7612	0.2388	0.4529	0.5471
2000		0.8673	0.1327	0.6090	0.3910	0.2369	0.7631

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	57		59		61	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9919	0.0081	0.9999	0.0001	0.9924	0.0076
100	0.9600	0.0400	0.9997	0.0003	0.9624	0.0376
365	0.8616	0.1384	0.9990	0.0010	0.8695	0.1305
500	0.8155	0.1845	0.9986	0.0014	0.8257	0.1743
1100	0.6384	0.3616	0.9970	0.0030	0.6562	0.3438
2000	0.4422	0.5578	0.9945	0.0055	0.4649	0.5351

CONJUNTOS DE CORTE								
Tiempo (días)	ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN							
	51,53		58, 59		54,55,56		60,61	
	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.999998	0.000002	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.999891	0.000109
100	0.999950	0.000050	0.999993	0.000007	1.000000	0.000000	0.997390	0.002610
365	0.999342	0.000658	0.999913	0.000087	0.999983	0.000017	0.969849	0.030151
500	0.998777	0.001223	0.999840	0.000160	0.999957	0.000043	0.947311	0.052689
1100	0.994325	0.005675	0.999281	0.000719	0.999573	0.000427	0.811916	0.188084
2000	0.982384	0.017616	0.997863	0.002137	0.997662	0.002338	0.591656	0.408344

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN		
Tiempo(Días)	R	F
20	0.9918	0.0082
100	0.9575	0.0425
365	0.8350	0.1650
500	0.7714	0.2286
1100	0.5148	0.4852
2000	0.2559	0.7441

### Sistema de control de peso.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 10, página 102.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 106.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 122.

Tiempo (días)	COMPONENTES							
	62,63		64		65		66	
	R	F	R	F	R	F	R	F
20	0.9857	0.0143	0.9988	0.0012	0.9962	0.0038	0.9924	0.0076
100	0.9305	0.0695	0.9943	0.0057	0.9814	0.0186	0.9624	0.0376
365	0.7689	0.2311	0.9792	0.0208	0.9337	0.0663	0.8695	0.1305
500	0.6977	0.3023	0.9716	0.0284	0.9103	0.0897	0.8257	0.1743
1100	0.4529	0.5471	0.9386	0.0614	0.8132	0.1868	0.6562	0.3438
2000	0.2369	0.7631	0.8912	0.1088	0.6866	0.3134	0.4649	0.5351

CONJUNTOS DE CORTE		
Elementos:65 y 66		
Tiempo (días)	R	F
20	1.0000	0.0000
100	0.9993	0.0007
365	0.9913	0.0087
500	0.9844	0.0156
1100	0.9358	0.0642
2000	0.8323	0.1677

SISTEMA DE CONTROL DE PESO		
Tiempo(Días)	R	F
20	0.9705	0.0295
100	0.8603	0.1397
365	0.5739	0.4261
500	0.4655	0.5345
1100	0.1802	0.8198
2000	0.0416	0.9584

### Sistema de agitación.

Árbol de fallo: Apéndice II, figura 11, página 103.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 106.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 122.

Tiempo (días)	COMPONENTES			
	67 y 69		68	
	R	F	R	F
20	0.9976	0.0024	0.9857	0.0143
100	0.9880	0.0120	0.9305	0.0695
365	0.9568	0.0432	0.7689	0.2311
500	0.9413	0.0587	0.6977	0.3023
1100	0.8754	0.1246	0.4529	0.5471
2000	0.7851	0.2149	0.2369	0.7631

CONJUNTOS DE CORTE		
Elementos:68 y 69		
Tiempo (días)	R	F
20	1.0000	0.0000
100	0.9992	0.0008
365	0.9900	0.0100
500	0.9823	0.0177
1100	0.9318	0.0682
2000	0.8360	0.1640

SISTEMA DE AGITACION		
Tiempo(Días)	R	F
20	0.9975	0.0025
100	0.9871	0.0129
365	0.9472	0.0528
500	0.9246	0.0754
1100	0.8157	0.1843
2000	0.6563	0.3437

### Sistema de precalentador.

Árbol de fallo: apéndice II, figura 8, página 100.

Tasas de Fallo: apéndice III, página 105.

Conjuntos de corte: apéndice V, página 122.

Tiempo (días)	COMPONENTES					
	42,43,44,45		49,50		47	
	R	F	R	F	R	F
20	0.9986	0.0014	0.9885	0.0115	0.9951	0.0049
100	0.9929	0.0071	0.9440	0.0560	0.9755	0.0245
365	0.9743	0.0257	0.8104	0.1896	0.9135	0.0865
500	0.9650	0.0350	0.7498	0.2502	0.8834	0.1166
1100	0.9247	0.0753	0.5307	0.4693	0.7612	0.2388
2000	0.8673	0.1327	0.3160	0.6840	0.6090	0.3910

Tiempo (días)	COMPONENTES			
	48		46	
	R	F	R	F
20	0.9924	0.0076	0.9802	0.0198
100	0.9624	0.0376	0.9048	0.0952
365	0.8695	0.1305	0.6942	0.3058
500	0.8257	0.1743	0.6065	0.3935
1100	0.6562	0.3438	0.3329	0.6671
2000	0.4649	0.5351	0.1353	0.8647

CONJUNTOS DE CORTE				
Tiempo (días)	ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN			
	42,43,44		48,50,49,46,47	
	R	F	R	F
20	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000
100	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000
365	0.999983	0.000017	0.999876	0.000124
500	0.999957	0.000043	0.999499	0.000501
1100	0.999573	0.000427	0.987938	0.012062
2000	0.997662	0.002338	0.915349	0.084651

SISTEMA DE PRECALENTADOR		
Tiempo(Días)	R	F
20	0.9986	0.0014
100	0.9929	0.0071
365	0.9742	0.0258
500	0.9645	0.0355
1100	0.9131	0.0869
2000	0.7920	0.2080

En general:

Evento Tope Paro de Planta						
Sistema	Enfriamiento		Iniciador		Agitación	
Tiempo (días)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)
20	0.9971	0.0029	0.9918	0.0082	0.9975	0.0025
100	0.9856	0.0144	0.9575	0.0425	0.9871	0.0129
365	0.9454	0.0546	0.8350	0.1650	0.9472	0.0528
500	0.9240	0.0760	0.7714	0.2286	0.9246	0.0754
1100	0.8219	0.1781	0.5148	0.4852	0.8157	0.1843
2000	0.6604	0.3396	0.2559	0.7441	0.6563	0.3437

Evento Tope Paro de Planta						
Sistema	Control de Peso		Alimentación		Precalentador	
Tiempo (días)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)	R(t)	F(t)
20	0.9705	0.0295	0.9798	0.0202	0.9986	0.0014
100	0.8603	0.1397	0.9029	0.0971	0.9929	0.0071
365	0.5739	0.4261	0.6885	0.3115	0.9742	0.0258
500	0.4655	0.5345	0.5995	0.4005	0.9645	0.0355
1100	0.1802	0.8198	0.3234	0.6766	0.9131	0.0869
2000	0.0416	0.9584	0.1274	0.8726	0.7920	0.2080

Evento Tope Paro de Planta		
Sistema		
t	F(t)	R(t)
20	0.0633	0.9367
100	0.2815	0.7185
365	0.7121	0.2879
500	0.8226	0.1774
1100	0.9816	0.0184
2000	0.9995	0.0005

## Apéndice VII

### RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN MONTECARLO

Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos de la simulación Montecarlo para los subsistemas y sistemas de los casos en estudio. Los resultados corresponden a los valores obtenidos de un total de 5000 simulaciones.

#### I. Evento Tope “Producto Fuera De Especificación”.

Subsistema de alimentación:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9510	0.9570	0.9450	0.2159	0.0060
100	0.7894	0.8007	0.7781	0.4078	0.0113
365	0.4098	0.4234	0.3962	0.4918	0.0136
500	0.2882	0.3008	0.2756	0.4530	0.0126
1100	0.0664	0.0733	0.0595	0.2490	0.0069
2000	0.0084	0.0109	0.0059	0.0913	0.0025

Subsistema de enfriamiento:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9628	0.9680	0.9576	0.1893	0.0052
100	0.8478	0.8578	0.8378	0.3593	0.0100
365	0.5354	0.5492	0.5216	0.4988	0.0138
500	0.4208	0.4345	0.4071	0.4937	0.0137
1100	0.1546	0.1646	0.1446	0.3616	0.0100
2000	0.0300	0.0347	0.0253	0.1706	0.0047

Subsistema de Catalizador:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	desv std	Intervalo Confianza
20	0.9624	1.0000	0.9571	0.1902	0.1902
100	0.8104	0.8213	0.7995	0.3920	0.0109
365	0.4654	0.4792	0.4516	0.4989	0.0138
500	0.3458	0.3590	0.3326	0.4757	0.4757
1100	0.0946	0.1027	0.0865	0.2927	0.0081
2000	0.0116	0.0146	0.0086	0.1071	0.0030

Subsistema de Agitación:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9770	0.9812	0.9728	0.1499	0.0042
100	0.8898	0.8985	0.8811	0.3132	0.0087
365	0.6680	0.6811	0.6549	0.4710	0.0131
500	0.5714	0.5851	0.5577	0.4949	0.0137
1100	0.2994	0.3121	0.2867	0.4580	0.0127
2000	0.1112	0.1199	0.1025	0.3144	0.0087

Subsistema de Control de Peso:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv std	Intervalo Confianza
20	0.9820	0.9857	0.9783	0.1330	0.0037
100	0.9150	0.9227	0.9073	0.2789	0.0077
365	0.7114	0.7240	0.6988	0.4532	0.0126
500	0.6246	0.6380	0.6112	0.4843	0.0134
1100	0.3612	0.3745	0.3479	0.4804	0.0133
2000	0.1594	0.1695	0.1493	0.3661	0.0101

Sistema con evento tope “Producto Fuera de Especificación”:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.8460	0.8560	0.8360	0.3610	0.0100
100	0.4358	0.4495	0.4221	0.4959	0.0137
365	0.0472	0.0531	0.0413	0.2121	0.0059
500	0.0158	0.0193	0.0123	0.1247	0.0035
1100	0.0004	0.0010	0.0000	0.0200	0.0006
2000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

## II. Producto Tope “Paro de Planta”

Subsistema de Alimentación:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9786	0.9826	0.9746	0.1447	0.0040
100	0.8984	0.9068	0.8900	0.3022	0.0084
365	0.6898	0.7026	0.6770	0.4626	0.0128
500	0.6042	0.6178	0.5906	0.4891	0.0136
1100	0.3264	0.3394	0.3134	0.4689	0.0130
2000	0.1354	0.1449	0.1259	0.3422	0.0095

Subsistema de Enfriamiento:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9980	0.9992	0.9968	0.0447	0.0012
100	0.9898	0.9926	0.9870	0.1005	0.0028
365	0.9578	0.9634	0.9522	0.2011	0.0056
500	0.9368	0.9435	0.9301	0.2433	0.0067
1100	0.8260	0.8365	0.8155	0.3791	0.0105
2000	0.6596	0.6727	0.6465	0.4739	0.0131

Subsistema de iniciador:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9916	0.9941	0.9891	0.0913	0.0025
100	0.9578	0.9634	0.9522	0.2011	0.0056
365	0.8334	0.8437	0.8231	0.3727	0.0103
500	0.7710	0.7826	0.7594	0.4202	0.0116
1100	0.5232	0.5370	0.5094	0.4995	0.0138
2000	0.2574	0.2695	0.2453	0.4372	0.0121

Subsistema de Agitación:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Minimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9976	0.9990	0.9962	0.0489	0.0014
100	0.9896	0.9924	0.9868	0.1015	0.0028
365	0.9456	0.9519	0.9393	0.2268	0.0063
500	0.9330	0.9399	0.9261	0.2500	0.0069
1100	0.8172	0.8279	0.8065	0.3865	0.0107
2000	0.6556	0.6688	0.6424	0.4752	0.0132

Subsistema de Control de Peso.

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9698	0.9745	0.9651	0.1712	0.0047
100	0.8562	0.8659	0.8465	0.3509	0.0097
365	0.5794	0.5931	0.5657	0.4937	0.0137
500	0.4550	0.4688	0.4412	0.4980	0.0138
1100	0.1756	0.1861	0.1651	0.3805	0.0105
2000	0.0418	0.0473	0.0363	0.2002	0.0055

Subsistema de Precalentador:

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Confianza
20	0.9996	1.0002	0.9990	0.0200	0.0006
100	0.9932	0.9955	0.9909	0.0822	0.0023
365	0.9730	0.9775	0.9685	0.1621	0.0045
500	0.9686	0.9734	0.9638	0.1744	0.0048
1100	0.9156	0.9233	0.9079	0.2780	0.0077
2000	0.7830	0.7944	0.7716	0.4122	0.0114

Sistema con evento Tope “Paro de Planta”

t	R(t)	R(t) Máximo	R(t) Mínimo	Desv Std	Intervalo Conf
20	0.9352	0.9420	0.9284	0.2462	0.0068
100	0.7254	0.7378	0.7130	0.4464	0.0124
365	0.2886	0.3012	0.2760	0.4532	0.0126
500	0.1822	0.1929	0.1715	0.3860	0.0107
1100	0.0142	0.0175	0.0109	0.1183	0.0033
2000	0.0012	0.0022	0.0002	0.0346	0.0010