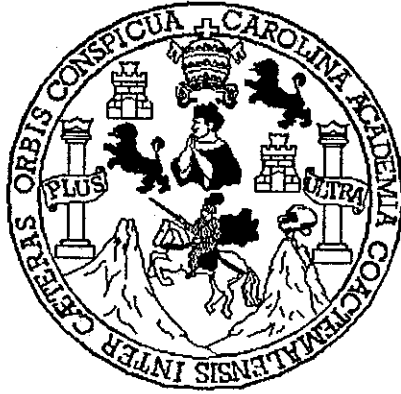


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIO EN EL  
SISTEMA DE SECADO EN TORRE DE DETERGENTE,  
EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA**

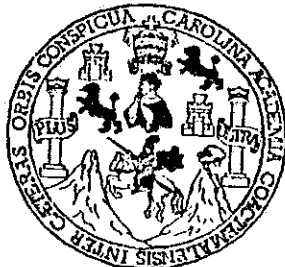
**TESIS**

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR**

**LUIS ALFONSO DÍAZ VALLE  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**Guatemala, junio de 1999**

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

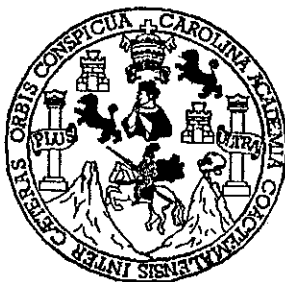
***Evaluación del riesgo de incendio en el sistema de secado en torre de detergente, en una empresa manufacturera***

Tema que me fue asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 12 de agosto de 1997.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Luis Alfonso Díaz Valle".

Luis Alfonso Díaz Valle

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert Miranda Barrios
VOCAL 1º	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL 2º	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL 3º	Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL 4º	Br. Dimas Alfredo Carranza Barrera
VOCAL 5º	Br. José Enrique López Barrios
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

### TRIBUNAL QUE PRECTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales
EXAMINADOR	Ing. Oscar Avendaño
EXAMINADORA	Ing. Leticia de Arriola
EXAMINADORA	Ing. Rosa María Giron
SECRETARIO	Ing. Edgar José Bravatti Castro



COLGATE-PALMOLIVE (CENTRO AMERICA), S. A.

Av. del Ferrocarril, 49-65, Zona 12  
Guatemala, C. A. 01012  
Tel.: 4-775511 (PBX)  
Apartado Postal 765-01901  
Fax: 4-775403

Guatemala, 8 de septiembre de 1998

Ing. Julio Chávez  
Director de escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Campus Central zona 12, ciudad

Estimado Ingeniero Chávez:

Tengo el agrado de informarle que he concluido el asesoramiento y revisión del documento final de trabajo de tesis del estudiante Luis Alfonso Díaz Valle, titulado *"EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIO EN EL SISTEMA DE SECADO EN TORRE DE DETERGENTE, EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA"*.

Considerando que el presente trabajo llena todos los requisitos de una tesis de grado y que además constituye un aporte para la disminución del riesgo de incendio en los procesos de secado en torre, recomiendo su aprobación.

Atentamente,

Ing. Manuel Emilio Figueroa Solares  
Colegiado No 426

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 17 de septiembre de 1,998.

Ingeniero  
Julio Chávez Montúfar  
Director, Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

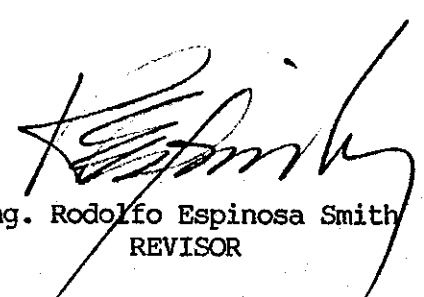
Estimado Ingeniero Chávez.

Después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he revisado el Informe Final de Tesis del estudiante **Luis Alfonso Díaz Valle**, titulado: **EVALUACION DEL RIESGO DE INCENDIO EN EL SISTEMA DE SECADO EN TORRE DE DETERGENTE, EN UNA EMPRESA MANUFACTURA**, de la cual dejo constancia de aprobación para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

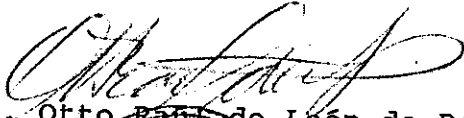



Ing. Rodolfo Espinosa Smith  
REVISOR



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ingeniero Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante Luis Alfonso Díaz Valle, titulado: EVALUACION DEL RIESGO DE INCENDIO EN EL SISTEMA DE SECADO EN TORRE DE DETERGENTE, EN UNA EMPRESA MANUFACTURA, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Otto Raúl de León de Paz  
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA

  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECTOR  
ESCUELA  
INGENIERIA QUIMICA  
U. S. A. C.

Guatemala, 22 de enero de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis titulado: **EVALUACION DEL RIESGO DE INCENDIO EN EL SISTEMA DE SECADO EN TORRE DE DETERGENTE, EN UNA EMPRESA MANUFACTURA**, del estudiante Luis Alfonso Díaz Valle, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert René Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, 22 de enero de 1,999.

## DEDICATORIA

A Dios nuestro señor, fuente de eterno amor y dador de nuestros dones.

A La Virgen María, madre y auxiliadora.

A mi madre

Irma J. Valle de Díaz

A mi hermano

Federico Guillermo Díaz Valle

A la memoria de

José Guillermo Díaz S. (Q.E.P.D)

José Pablo Díaz Gómez (Q.E.P.D)

Rosa Lidia Santizo de Díaz(Q.E.P.D)

A mi sobrino

José Guillermo Díaz Donis

A mis amigos, en especial a

Ing. Franz Apel Sierra

Ing. Jairo Barraza López

Ing. Juan A. García Villatoro

Ing. Oscar Estrada

Ing. Julio Alvarez

Ing. Ingrid Figueroa de De la Riva

A mi novia

Ing. Ana Luisa Cacacho Ch.

A todos los que de una u otra forma me apoyaron en este caminar.



# ÍNDICE GENERAL

	PAGINA
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE SÍMBOLOS	III
GLOSARIO	IV
INTRODUCCIÓN	VI
1. PREMISAS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Hipótesis	5
2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS	6
2.1 Proceso de combustión	7
2.2 Proceso de elaboración de detergente	11
3. ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL	18
3.1 Descripción del sistema actual	19
3.2 Diagrama del sistema actual	23
3.3 Análisis del sistema	
3.3.1 Matrices de afinidad	24
3.3.2 Árbol de falla general	27
3.3.3 Cálculo de muestra de "cut sets"	28
3.3.4 Resumen de "cut sets"	31
3.3.5 Diagramas de Pareto	32
4. ANÁLISIS DEL SISTEMA PROPUESTO	34
4.1 Descripción del sistema actual	35
4.2 Diagrama del sistema actual	40
4.3 Análisis del sistema	

4.3.1	Árbol de falla general	41
4.3.2	Resumen de "cut sets"	42
5.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	43
5.1	Tablas de resultados	44
5.2	Diagrama de Griffin	45
5.3	Discusión de resultados	46
	CONCLUSIONES	52
	RECOMENDACIONES	54
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	BIBLIOGRAFIA	56
	ANEXOS	
A.	Arboles de falla detallados del sistema actual	57
B.	Cut Sets detallados del sistema actual	64
C.	Árboles de falla detallados del sistema propuesto	68
D.	Cut Sets detallados del sistema propuesto	75
E.	Flujo de Combustible Teórico para el sistema propuesto	79
E.1	Balances con 2,3 y 4 toberas	80
E.2	Hojas de Cálculo para 2,3 y 4 toberas	83
E.3	Cálculo de muestra del balance	86








## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

No.	FIGURAS Título	Página
1	Triángulo de fuego	17
2	Diagrama del sistema actual	23
3	Árbol de falla general del sistema actual	27
4	Diagrama de Pareto causas generales	32
5	Diagrama de Pareto causas de factor humano	33
6	Diagrama del sistema propuesto	40
7	Árbol de falla general del sistema propuesto	41
8	Diagrama de Griffin	45
9	Árbol de fallas sistema actual (incendio)	58
10	Árbol de fallas sistema actual (elevada temperatura op.)	59
11	Árbol de fallas sistema actual (problema con pasta.)	60
12	Árbol de fallas sistema actual (colector)	61
13	Árbol de fallas sistema actual (temperatura horno alta)	62
14	Árbol de fallas sistema actual (autoignición)	63
15	Árbol de fallas sistema propuesto (Incendio)	69
16	Árbol de fallas sistema propuesto (elevada temperatura de op.)	70
17	Árbol de fallas sistema propuesto (problema con pasta)	71
18	Árbol de fallas sistema propuesto (colector)	72
19	Árbol de fallas sistema propuesto (temperatura horno alta)	73
20	Árbol de fallas sistema propuesto (autoignición)	74
21	Balance de secado con 4 toberas	80
22	Balance de secado con 3 toberas	81
23	Balance de secado con 2 toberas	82

## TABLAS

No.	Título	Página
I	Matriz de afinidad (torre)	25
II	Matriz de afinidad (horno)	26
III	Matriz de afinidad (colector)	26
IV	Resumen Cut Sets sistema actual	31
V	Resumen Cut Sets sistema propuesto	42
VI	Determinación de la confiabilidad del sistema	44
VII	Determinación del riesgo por factores humanos	44
VIII	Cut Sets mínimos del sistema actual, torre	65
IX	Cut Sets mínimos del sistema actual, colector	66
X	Cut Sets mínimos del sistema actual, horno	67
XI	Cut Sets mínimos del sistema propuesto, torre	76
XII	Cut Sets mínimos del sistema propuesto, colector	77
XIII	Cut Sets mínimos del sistema propuesto, horno	78
XIV	Hoja de calculo balance de secado en torre, 4 toberas	83
XV	Hoja de calculo balance de secado en torre, 3 toberas	84
XVI	Hoja de calculo balance de secado en torre, 2 toberas	85

## LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO	DESCRIPCION
Po	Probabilidad de ocurrencia.
Ps	Función de severidad.
Pi,J	Función de riesgo (Po*Ps) del elemento del tópico i, y la fila j.
T1	Temperatura de entrada de entrada del aire a la torre.
T2	Temperatura de salida del aire exhausto de la torre.
T3	Temperatura de salida del aire del horno.
T4	Temperatura de entrada del aire al plenum.
T5	Temperatura de entrada del aire al colector.
T6	Temperatura de salida del aire del colector.
P1	Presión de atomización.
	Evento o condición que no es final en un árbol de fallas.
	Elemento o falla atómica. No se necesita seguir analizando.
	Elemento pendiente de análisis.
	Condición "O", conocida como OR. Es la suma de probabilidades de los elementos.
	Condición "Y", conocida como AND. Es la multiplicación de los elementos.
	Conector. Pasa a otra parte del diagrama
	Conector. Viene de otra parte del diagrama.

## GLOSARIO

- Árbol de fallas** Gráfico que se caracteriza por tener un enfoque altamente deductivo, de gran utilidad para analizar la relación lógica entre varios elementos.
- Automa** Nombre que suele dársele a los equipos de control automático.
- Combustión** Reacción de oxidación de un combustible. Para que se dé la combustión deben existir tres elementos que son: combustible, oxidante y fuente de calor.
- Confiabilidad** Es la probabilidad de que un sistema trabaje correctamente, durante un tiempo determinado y bajo las condiciones para las cuales fue diseñado.
- Crutcher** Nombre con el que se conoce el mezclador donde se adicionan los materiales que forman el "slurry" o pasta.
- Cut set** Se conoce también como cortadura, y son el conjunto de probabilidades de elementos atómicos que pueden llegar a producir la falla total del sistema.
- Elemento atómico** Se le llama evento o elemento atómico a lo que ya no puede seguir dividiéndose para ser analizado, por lo que resulta ser un evento independiente y ajeno.

<b>Griffin</b>	Diagrama que permite visualizar dos condiciones distintas, en tres o cuatro ejes.
<b>Ingrediente activo</b>	Conocido también como IA, es el material que tiene la función de limpieza, en un detergente suele ser el dodecilbencensulfonato de sodio (o también conocido como alquilbencensulfonato de sodio, ABS).
<b>PLC:</b>	Son las siglas en inglés de lo que se conoce como Controlador Lógico Programable.
<b>Punto de inflamación</b>	Es la temperatura a la cual un líquido o algunas veces los sólidos, generan suficiente vapor para que se inicie la combustión, al ponerse en contacto con una fuente de calor.
<b>Rate de secado</b>	Nombre en inglés de tasa de secado, que es la relación de kilogramos secados por hora.
<b>Riesgo</b>	Función que se describe como la multiplicación de las probabilidades de ocurrencia y de severidad.
<b>"Slurry" (pasta)</b>	Nombre en inglés con el que se le conoce a la pasta o detergente húmedo.
<b>Surfactante</b>	Material que actúa en la superficie.
<b>Tiempo real</b>	Una de las formas de transmisión de datos, la cual se caracteriza por ser instantánea.

## INTRODUCCIÓN

A grandes rasgos un detergente es un producto de limpieza que remueve la suciedad de superficies manchadas, dispersándolas en el agua de lavado. Existen varias formas de elaborar un detergente, tales como: secado por atomización, mezcla seca, adsorción de líquido surfactante en sal inorgánica y secado en tambor. De todos ellos el método más utilizado para la fabricación de detergentes livianos (densidad aparente de 0.15 a 0.45 gr/cm<sup>3</sup>), es el de secado por atomización, también conocido como secado en torre.

El secado por atomización es un método para remover el agua de un material, el cual es atomizado y puesto en contacto con un flujo de aire caliente a contra corriente, dentro de la torre, que es el equipo principal del sistema. Todos los materiales que son atomizados y secados dentro de la torre deben ser resistentes a la temperatura, es decir no deben ser sujetos a descomposición o a pérdidas por efecto térmico.

Una de las principales preocupaciones durante el proceso de secado del detergente en torre es la posible generación de un incendio en alguno de los elementos del sistema, lo cual se discute en la sección de *Proceso de Combustión, en el capítulo 2.*

Un siniestro de esta naturaleza puede tener consecuencias de gran magnitud como: la pérdida de vidas humanas, lesiones físicas de los trabajadores, valores monetarios debidos a la destrucción parcial o total del equipo y al falta de presencia de la marca en el mercado. En esta tesis, se evalúa el sistema por medio de diagramas de Árbol de Fallas y el método de



cortaduras mínimas, con lo que se llega a determinar que el 80.5% del riesgo de incendio proviene de factores de tipo humano, es decir que la incidencia de los operadores en el control del proceso es vital. Es por ello que se diseña un sistema de control automatizado, el cual recibe las señales de los dispositivos de control, en tiempo real, y genera salidas que pueden ser alarmas de aviso al operador o control sobre otros equipos y componentes del sistema. Todo ello hace que aumente la confiabilidad del proceso a 99.55%, esto es la probabilidad de que el sistema funcione correctamente (sin falla de incendio) bajo las condiciones para las cuales fue diseñado.

La evaluación del riesgo del sistema se basa en el establecimiento del riesgo de cada elemento del sistema, así como de diagramar la relación que existe entre ellos, de tal forma que se puede determinar con mucha precisión lo que sucede en el momento de entrar en falla uno o más de los elementos, inclusive cuando fallan en forma simultanea. Ésto convierte al método utilizado en una buena herramienta para analizar problemas complejos.

El sistema propuesto en esta tesis, no solo disminuye el riesgo de incendio en el proceso de secado de detergente en polvo, si no que además tiene impacto en el mejoramiento de la productividad y la calidad del producto.

# 1. PREMISAS DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 Antecedentes

El estudio del riesgo de incendio de una torre de secado es realizado para una empresa multinacional, ubicada en Guatemala y dedicada a la fabricación, distribución y comercialización de productos para el cuidado personal, cuidado de la ropa y cuidado del hogar, para el mercado centroamericano.

El día 24 de junio de 1995 se originó un incendio en el colector de polvos de la planta de fabricación de detergentes, lo cual contrajo pérdidas para la empresa, ya que obligó a la planta estar fuera de operaciones por un período de 134.5 horas. Estas pérdidas fueron catalogadas como: costo de no colocar producto en el mercado (Lucro Cesante) y el costo del equipo que se dañó en el siniestro.

El costo de no colocar producto en el mercado fue calculado en un monto de Q 320,000.00. Por otro lado todos los gastos en que la empresa incurrió debido a la inversión de reinstalación del equipo dañado; es decir, todos los gastos de reparación o reemplazo, fueron calculados en Q2,030,000.00. Por lo que el incendio de este equipo generó una pérdida de Q2,350,000.00, más la probable pérdida de participación de la marca en el mercado. La tasa de cambio de la moneda utilizada para los cálculos fue de Q5.80 / US\$.

Casos como el suscitado en esta planta no son del todo frecuentes, pero tampoco es un caso único, ya que se sabe que en otras plantas similares de Sur América han ocurrido siniestros de esta naturaleza en este tipo de equipo, por lo que se puede decir que el riesgo de incendio de algún elemento del

proceso de secado en torre es latente. Debido a ello es que este tipo de plantas cuenta con sistemas contra incendios, los cuales permiten extinguir los incendios, pero no pueden prevenirlos. Actualmente, no se cuenta con ningún estudio de dicha planta que revele cual o cuales son los elementos que contribuyen al riesgo de incendio, con el fin de lograr mejorar la confiabilidad del sistema.

## **1.2 Justificación**

Los incendios en una planta de fabricación de detergentes pueden producir pérdidas de gran dimensión como: la pérdida de vidas humanas, lesiones de los trabajadores, destrucción total o parcial del equipo y disminución de la participación de la marca en el mercado, etc.

Debido al alto grado de pérdidas que una empresa afrontaría en el caso de incendiarse el proceso de fabricación de detergentes, es que se acostumbra tener en él un sistema contra incendios, que permita extinguirlo unos momentos después de haberse iniciado. Estos sistemas son correctivos, ya que funcionan para evitar la propagación del incendio y así disminuir el peligro, pero en ningún momento evitan que éste se produzca. De ahí nace la necesidad de evaluar que tan confiable es el sistema de elaboración de detergente que se tiene, así como determinar los puntos claves que tengan mayor probabilidad de generar un incendio, todo ello con el fin de proponer modificaciones que aumenten la confiabilidad del sistema de producción, haciéndolo más seguro a través de prevenir los incendios en lugar de sólo extinguirlos.

Es política de la empresa brindar a sus trabajadores un ambiente seguro en el cual puedan desempeñar sus labores, por lo que resulta sumamente beneficioso minimizar el riesgo actual de incendio del sistema de secado de detergente, con el fin de evitar que se produzca de nuevo un siniestro de dicha naturaleza en la planta que se analizará, consecuentemente se evitarán pérdidas o lesiones humanas de los trabajadores, los altos gastos de reconstrucción del equipo y la probable pérdida de participación del mercado al estar fuera de operaciones la planta. Este tipo de estudios puede ser de utilidad a plantas que tengan procesos similares o podría ser extendido a otros procesos de interés.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 General**

Demostrar que la automatización del secado de detergente reduce el riesgo de incendio en el proceso, al disminuir la incidencia del factor humano en la operación.

### **1.3.2 Específicos**

- 1.3.2.1 Establecer la relación de incidencia del factor humano sobre el riesgo de incendio del sistema actual .
- 1.3.2.2 Evaluar el grado de riesgo de incendio que presenta actualmente el sistema de secado de detergente en torre, estableciendo para cada elemento del sistema, la probabilidad de ocurrencia.
- 1.3.2.3 Diseñar un flujo gráfico que permita representar, identificar y localizar los elementos del sistema que pueden dar origen a un incendio en el sistema actual, así como en el propuesto.
- 1.3.2.4 Disminuir el riesgo de incendio diseñando un proceso automatizado para la elaboración de detergente en torre.

## **1.4 Hipótesis**

*Si se disminuye la dependencia del factor humano en los controles de operación, será menor la probabilidad de incendio en la torre de secado de detergente.*

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS

### 2.1 Proceso de combustión

En términos generales la combustión es una reacción química en donde una sustancia (combustible) se combina con oxígeno, produciéndose oxidación, la cual genera regularmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Por otro lado, un incendio se puede definir sencillamente como la combustión no deseada de algún material. (Ref. No 1)

Para que la reacción de combustión pueda generarse, existen ciertas condiciones que deben presentarse, las cuales han sido denominadas comúnmente como el *triángulo del fuego*. Este triángulo establece que para que se dé la combustión es indispensable contar con tres agentes que son: EL COMBUSTIBLE, EL OXIDANTE y UNA FUENTE DE CALOR. (Ref. No 2)

Figura No 1: Triángulo de fuego



- Se le denomina combustible a cualquier materia que contenga carbono en su estructura molecular y que sea capaz de arder. (Ref. No 3)

- El agente oxidante es la fuente de oxígeno necesaria para que se produzca la combustión, generalmente el más utilizado es el aire (79% nitrógeno y 21% oxígeno) debido a su abundancia, aunque hay que tener presente otros oxidantes importantes como los peróxidos que en algunas ocasiones han sido generadores de grandes incendios. (Ref No 4)
- La fuente de calor es la última de las condiciones representadas en el triángulo de fuego y resulta ser la fuente de ignición o la energía necesaria para que sea posible la combustión. Debido a las múltiples formas en que se pueden presentar las fuentes de ignición, se mencionan algunas que son las más comúnmente encontradas en las industrias: flama, luces incandescentes, cigarrillos encendidos, superficies calientes, calor de fricción, estática, calor de reacciones químicas, chispas eléctricas o mecánicas, chispas de soldadura o corte, ignición espontanea, etc.

Es importante notar que para que se produzca el fuego (la combustión) es indispensable que los tres elementos del triángulo se encuentren presentes en las condiciones apropiadas, en caso contrario no se dará

Se conoce como punto de inflamación de un combustible a la temperatura más baja de un líquido en la cual se vaporizará lo suficiente para formar una mezcla con el aire capaz de entrar en combustión al ser aplicada una fuente de ignición. El punto de inflamación (Flash point) es la principal característica para la clasificación entre líquidos inflamables y combustibles, ya que cuanto más bajo es, resulta más fácil su combustión. Así que un material inflamable se define como: todo aquel cuyo punto de inflamación sea menor a 37.78 °C (100 °F). Por otro lado, los materiales combustibles son: todos aquellos que tienen un punto de inflamación igual o mayor que 37.78 °C (100 °F). (Ref. No 5)



Otra característica importante en los materiales combustibles es el llamado punto de *auto-ignición, ignición espontánea o temperatura de ignición*, el cual es la temperatura mínima requerida para iniciar o dar lugar a una combustión espontánea, independientemente de la presencia de un foco de ignición. Esta propiedad no tiene ninguna relación con el punto de inflamación. (Ref. No 6)

Para que se genere la combustión no basta solamente con tener las tres condiciones ya mencionadas, sino que es necesario que la concentración del combustible y del aire sean apropiadas. A la menor concentración de aire-combustible necesaria para que se produzca la ignición se le conoce como límite inferior de inflamabilidad, ya que por debajo de este valor de concentración la mezcla es muy pobre y no se produce la combustión. Por el contrario el límite superior de inflamabilidad es la mayor concentración de aire-combustible necesaria para que ocurra la ignición de un material, por lo que en concentraciones superiores a ésta no se producirá la combustión debido a que la mezcla es muy rica. Es así que existe un rango de concentración de ambos en el cual es factible la ignición y el mantenimiento de la combustión, éste se encuentra determinado por los límites inferior y superior de inflamabilidad. Es por ello que si en algún momento las condiciones de operación del proceso de secado y las características de los materiales utilizados se llegaran a encontrar en el rango de inflamabilidad, es posible la generación de un incendio.

En el proceso de secado por atomización se cuenta con algunos materiales inflamables y combustibles como: el keroseno o querosina, el dodecilbencensulfonato de sodio, toluensulfonato de sodio, antifoam (emulsión de silicon), carboximetil celulosa y tela nomex (mangas filtrantes fabricadas de poliamida aromática ).

El keroseno es un inflamable derivado del petróleo, el cual es utilizado en un quemador (Horno) para calentar el aire que se ingresa a la torre para secar el detergente.

La denominada tela nomex es el material filtrante que utiliza el colector de polvo de gases exhaustos, con el fin de evitar la contaminación ambiental, es importante mencionar este material debido a que tiene una temperatura de operación máxima de 220°C; las condiciones de trabajo del colector se encuentran cerca de 160°C, aunque en algunas ocasiones, como arranques, puede llegar a sobrepasar los 200 °C. Cabe indicar que este material fue el que se quemó en el reciente incendio en la torre, del cual se hace referencia en la sección de *antecedentes* . (Ref. No 7)

Los demás materiales mencionados forman la pasta (detergente húmedo) que será atomizada y secada en la torre, todos ellos tienen cierto riesgo de incendio, lo que hace que la pasta sea un material que puede entrar en combustión dentro de la torre al ser secado, ya que se cuenta con las tres condiciones para que se dé la combustión.

Además, vale la pena mencionar que cuanto más pequeña es la partícula del combustible, más fácil es que entre en combustión, debido a que existe mayor contacto con el oxígeno, es por ello que si hay demasiado calor en la torre al momento de secar es posible que se genere un incendio.

## **2.2 Proceso de elaboración de detergente**

El proceso de elaboración del detergente en torre se divide básicamente en dos partes que son: proceso húmedo y proceso seco.

El proceso húmedo se refiere a todo lo concerniente a la preparación de la pasta (slurry), su manejo y atomización dentro de la torre de secado. Mientras que el seco se refiere al transporte, separación de partícula, postdosifi

mejoradores (como secuestrantes, blanqueadores ópticos, antiredepositante, carbonato de sodio, etc.) y los materiales de relleno. Esta mezcla se produce en medio acuoso donde se desea tener la mayor cantidad de sólidos posible, aunque no es común encontrar un nivel de sólidos arriba de 65%.

El ingrediente activo puede provenir de una etapa de neutralización previa o también puede realizarse "in situ" (en el crutcher). De todos los materiales que se adicionan al crutcher, solo el alquilbencensulfonato de sodio (ingrediente activo, ABS) posee un riesgo de inflamabilidad. Es por ello que difícilmente se secan formulas con concentraciones mayores a 35% en este tipo de proceso. Si se desea secar una pasta con una concentración alta, es necesario tener ciertos cuidados debido a que el "slurry" puede ser muy liviano y al ser atomizado dentro de la torre incendiarse.

La pasta que resulta de este paso se le conoce como slurry, y no es más que el detergente húmedo, el cual suele tener valores entre 7,000 y 15,000 cp de viscosidad y cerca de 60 °C de temperatura; aunque, por supuesto, estos valores dependen del tipo y cantidad de materiales según este compuesta la pasta.

Después del Crutcher es común encontrar tanques de almacenamiento temporal, los cuales tienen la función de convertir el proceso de un sistema intermitente a uno continuo. Algunas veces se les conoce a estos tanques con el nombre de Drop Tank.

La pasta es conducida a través de tubería y por gravedad por una trampa magnética, la cual cuenta con una serie de barras imantadas, que son capaces de atrapar cualquier parte metálica que pueda venir en la pasta, con el fin de disminuir los daños en el equipo. Luego pasa por un molino de martillos, el cual tritura cualquier material que no ha sido disuelto en el crutcher, lo que permite homogenizar la pasta (slurry).

Inmediatamente después de pasar por el molino se bombea la pasta con una bomba de baja presión reciprocante, de velocidad variable; es común encontrar de las accionadas por vapor como las Simplex (piston simple), las cuales varían su velocidad por medio de la igualar la presión de vapor dentro de un embolo con la presión de la pasta en la tubería. La finalidad de esta bomba es garantizar el abastecimiento de pasta a las bombas de alta presión, según como sea requerido. (Ref. No 8)

Las bombas de alta presión deben cumplir con dos funciones, primero deben ser capaces de trasladar la pasta(slurry) hasta el lugar de atomización, venciendo la presión estática; y luego debe proveer la presión mínima de atomización, que es por arriba de 400psi. Regularmente, se utilizan bombas de desplazamiento positivo de émbolos o triplex, puede utilizarse una o más bombas en serie, dependiendo de la cantidad de flujo masco que se desee introducir a la torre.

La atomización se produce cuando la pasta presurizada pasa a través de un juego de piezas conocido como toberas, las cuales forman un abanico de diminutas gotas de pasta. La ubicación de las toberas es en la parte interna de la torre, de tal manera que pueda ponerse en contacto la pasta(slurry) con el aire caliente, el cual pasa a contracorriente. Se deben poner simétrica mente dentro de la torre para evitar turbulencia y aumentar la eficiencia del secado; el numero de toberas de una torre puede variar, incluso puede llegar a tenerse más de un nivel de atomización. (Ref . No 9).

Las toberas pueden llegar a taparse en algún momento, debido a grumos en la pasta que pueden no haber sido triturados por el molino, o por pequeñas partículas metálicas o contaminantes de alguna materia prima, es por ello que se debe contar siempre con algunas toberas de repuesto, de tal forma que en el momento en que se obstruya alguna se pueda desviar el flujo a la siguiente, lo más rápido posible. El riesgo que existe en el momento en que se tapa una tobera es de una sobre presión, la cual puede dañar los empaques de las bombas o romper la tubería; por otro lado el flujo de pasta (slurry ) que ingresa a la torre disminuye, y por consecuencia la temperatura dentro de la misma aumenta, pudiendo presentarse un sobre calentamiento.

La parte inicial del proceso seco es el calentamiento de aire, el cual se produce a través de la quema de un combustible (queroseno, gas, búnker, etc.), el cual es puesto en contacto con un flujo másico de aire frío, a fin de elevar la temperatura de este último entre 350 y 400 °C. El aire frío es introducido al sistema por medio de un ventilador, el cual debe ser capaz de impulsar el flujo másico de aire que sea necesario para secar el flujo de pasta que se está atomizando. El flujo de aire frío que entra es necesario graduarlo y se hace a través de un sistema de compuertas neumáticas o dampers. La cantidad de calor

que entra a la torre depende de la cantidad de combustible que se queme en el horno, esta puede graduarse según sea necesario, a través de variar la presión del combustible.

El aire caliente proveniente del horno, entra a la torre por el plenum, el cual es un ducto que rodea la torre y tiene forma de caracol; es decir, reduce el área transversal a medida en que va circulando la torre, esto es para mantener igual la presión del aire en todos los puntos. En el "plenum" se encuentran las compuertas de entrada a la torre, las cuales deben estar equidistantes y poseen dampers para poder dirigir la forma como entrará el aire, a estas compuertas se les conoce como Tuyeres y son vitales, pues de ellos depende la turbulencia que se puede producir dentro de la torre. La turbulencia dentro de la torre no es deseada, pues hace que las pequeñas partículas de pasta que vienen bajando se peguen a las paredes, lo cual produce los denominados gruesos el cual debe ser separado y reprocesado. Existen dos formas de orientar los dampers, en forma tangencial o en radial, la más apropiada depende del diseño de cada torre, siendo así que se debe de encontrar una posición óptima donde se reduzca la formación de gruesos.

La finalidad de la torre de secado es únicamente evaporar el agua de la pasta al incrementar el intercambio de energía y de materia entre el producto a secar y el agente secador. Este tipo de torres de secado por atomización, pueden dividirse en dos, que son: de flujo en paralelo y de flujo en contra corriente. (Ref. No 10)

Las torres de flujo paralelo son aquellas en las que la dirección del flujo de aire y del componente que se quiere secar tienen el mismo sentido, mientras que las de flujo contra corriente, fluyen a sentido contrario. En este último, es común que la pasta se atomice en la parte superior, esperando que descienda por

gravedad, mientras que el aire caliente se ingresa al sistema y se ve forzado a salir en la parte superior de la torre.

La torre de secado que se analiza en este estudio es de flujos a contra corriente, por lo que se introduce aire caliente (cerca de 400 °C) y se saca mismo tiempo aire exhausto por la parte superior (cerca de 100 °C).

La cantidad de aire que se saca en la parte superior suele ser mayor que la que es ingresada en la torre, es por ello que se produce una presión ligeramente negativa dentro del sistema. Es bueno que esta presión no sea demasiado alta, no mayor de 1 pulgada de agua de vacío (248 Pa), ya que de ser así, buena parte del producto se irá a la parte superior de los gases exhaustos; y por el contrario si la presión llega a ser positiva, entonces se corre el riesgo de romper la torre si no se activa el mecanismo de puertas de seguridad en caso de sobre presiones. En la torre hay dos salidas una en la parte superior la cual sirve para evacuar los gases exhaustos; y la otra en la parte inferior conocido también como cono, en el cual cae el detergente en polvo.

Existen dos sensores de temperatura o termopares (termocuples), los cuales se ubican uno en la entrada de la torre (puede ser en el plenum o muy cerca de él) al cual se le denomina T1; y el otro en la salida de los gases exhaustos (parte superior de la torre) al cual se le llama T2. Estos sensores envían su señal a la cabina de la torre donde se deben controlar por medio de regular el flujo de aire caliente que entra o de la presión del combustible. La T2 es menor que T1 debida a que el aire ha cedido el calor a la pasta a fin de evaporar el agua, cuanto más cerca del punto de ebullición se encuentre será mejor, pues indica que se está aprovechando de mejor manera el calor; por otro lado, si esta temperatura es muy alta quiere decir que el producto saldrá muy seco. Por lo general la graduación de

esta será lo más bajo que se pueda siempre y cuando el producto salga con la humedad deseada.

Los gases exhaustos son una mezcla de aire ( en su mayoría), vapor de agua que ha sido evaporada de la pasta, pequeñas partículas de detergente seco conocido como finos los cuales son arrastrados por su bajo peso, y gases de combustión. Para soltar estos gases al ambiente es necesario limpiarlo de las partículas de detergente que van dispersas en el, es por ello que se cuenta con separadores de tipo ciclón y con filtros manga conocidos como colectores de polvos. Este último debe contar con un tipo de mangas especiales para que no permita el paso de una pequeña partícula de detergente, es por ello que se utiliza un material conocido comercialmente como Nomex, el cual es una poliamida aromática que tiene un límite de temperatura de operación es de 220 °C, lo que quiere decir que arriba de ese valor existe un alto riesgo de que se incendien.

En la parte inferior de la torre, conocida como cono caen todas las partículas de detergente, por su puesto con diferente granulometría, por lo que lo primero que se hace es trasladar el producto por medio de una banda transportadora hasta la parte inferior de un ducto, en el cual se eleva el detergente hasta la parte más posible (cerca de 20 metros), ésto es conocido como Air Lift, el cual tiene dos funciones; primero separar el producto de granulometría deseada, de los gruesos que caen de la torre. Esto se da debido a que al ser levantado el producto neumáticamente de la banda, las partículas muy pesadas (gruesos) caen por gravedad, produciéndose así la separación. La segunda función es enfriar el detergente, lo que es necesario para que se puedan post dosificar algunos materiales que son térmicamente sensibles.



Al llegar a la parte superior del ducto se encuentra un colector denominado burbuja, el cual esta diseñado para recibir el producto del Air Lift con el mínimo daño en la partícula, y a la vez separar el producto fino que se encuentre presente. Este detergente fino es llevado hacia un colector de polvos el cual limpia el aire que ha servido para elevar el producto desde la banda transportadora hasta la burbuja. Por otro lado, lo que sale de la burbuja es producto con la granulometría deseada, el cual pasa al área de post dosificación, lugar en el cual se adicionan perfumes, enzimas, activos no ionicos, etc.

Para lograr una mezcla homogénea de los materiales que se post dosifican, se utiliza un tambor rotatorio, el cual posee unos baffles internos que mueven suavemente el producto mientras gira el tambor. Luego de esto el producto es tamizado para separar algunos grumos que se puedan formar en la etapa anterior, para después depositar el producto terminado en carretones conocidos en el medio como (bugies o totes), allí se encuentra el detergente en polvo terminado y listo para ser empacado.

### **3. ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL**

#### **3.1 Descripción del sistema actual**

Los puntos de control de operación de la torre son los siguientes:

**Presión estática de la torre:** esto se logra a través de un manómetro, el cual mide el diferencial de presión entre el aire caliente que entra y el aire exhausto que sale de la torre, esta presión barométrica debe ser de vacío, para que el producto sea suspendido un pequeño tiempo dentro de la torre y así mejorar la evaporación; siempre y cuando no sea tan grande el vacío que arrastre el producto hacia la parte de los gases exhaustos, pues sería recolectado por el ciclón o el colector de polvos, por lo que se tendría que reprocesar.

Por otro lado, si la presión estática dentro de la torre fuese positiva, produciría en algún momento rupturas de las paredes de la torre, si no se activaran los dispositivos de seguridad para sobre presión.

Esta presión se obtiene estrangulando el flujo de aire por medio de la compuerta del ventilador de entrada de aire (vent. 60Hp) y el ventilador de salida (vent. 100 Hp), de tal forma que si que quiere aumentar el vacío se puede abrir más la compuerta de salida o bien cerrar la de la entrada.

Este control lo realiza el operador de la Torre, en la cabina de control, regulando la presión de aire de los cilindros neumáticos que controlan las compuertas de cada ventilador.

**Presión de atomización:** la presión con la que la pasta es atomizada es controlada por un manómetro que se encuentra a la salida de las bombas de alta presión. La presión de atomización depende directamente de la densidad del producto que se desea obtener, la viscosidad de la pasta y la densidad de la pasta. Regularmente se busca tener una pasta que de la densidad final de producto deseada y que pueda bombearse con una presión entre 400 y 1000 psi (de  $2.75$  a  $6.9 \times 10^6$  Pa).

**Temperatura de entrada a Torre:** a esta temperatura se le conoce regularmente como T1, y es la temperatura a la que se ingresa el aire caliente a la torre. Esta lectura se obtiene a través de un sensor (termopar) el cual envía una señal a la cabina de operaciones, por lo que se tiene una lectura de este valor en tiempo real.

Esta temperatura es el resultado del calentamiento de aire frío (temp. ambiental) por medio de la quema de keroseno en el horno. Entre el horno y la entrada a la torre, existen pérdidas de calor, por lo que usualmente se tiene otra lectura en la salida del horno y el sensor de la T1 se coloca en el plenum. Este valor depende del flujo masico de aire que se alimenta a la torre para secar una cantidad determinada de producto, por lo que su valor se encuentra comúnmente entre  $350$  y  $400$  °C, aunque en algunas plantas se han reportado valores bajos de  $275$  °C o tan altos como  $416$  °C. (Ref. No 11)

El máximo de temperatura de entrada en la torre puede variar, dependiendo del tipo de ingrediente activo que se seque, si se trata de un anionico, pueden tenerse valores tan altos como  $415$ °C, pero si lo que se usa es un no ionico, el maximo puede ser de  $350$ °C. (Ref. No 12)

El operador de torre es quien realiza los ajustes en la alimentación de combustible y el aire frío (vent. 60 hp) para mantener la T1 en el rango de temperatura mencionado.

**Temperatura de salida de Torre:** en la parte superior de la torre de secado se ubica la salida de los gases exhaustos, a los cuales se les toma la temperatura, la cual es conocida regularmente como T2. Este valor indica que tanto se esta secando el producto, por lo que es un parametro critico. Muchas de las plantas trabajan con valores cercanos a 95 °C, aunque el rango actual de esta temperatura varia de 70 a 120 °C. (Ref. No 13)

El valor de esta temperatura debe ser lo más bajo que se pueda siempre y cuando logre evaporársele al producto toda la humedad deseada. Si la T2 es muy alta, el balance entre la cantidad de producto-aire caliente alimentado a la torre es erróneo, lo cual produce perdida de calor o en el peor de los casos un sobrecalentamiento en la torre, que pudiera generar un incendio.

El operador de torre mantiene un monitoreo constante de los valores de esta temperatura, ya que puede aumentar por problemas de bombeo o de mal balance entre el aire caliente y el flujo masico de pasta atomizado.

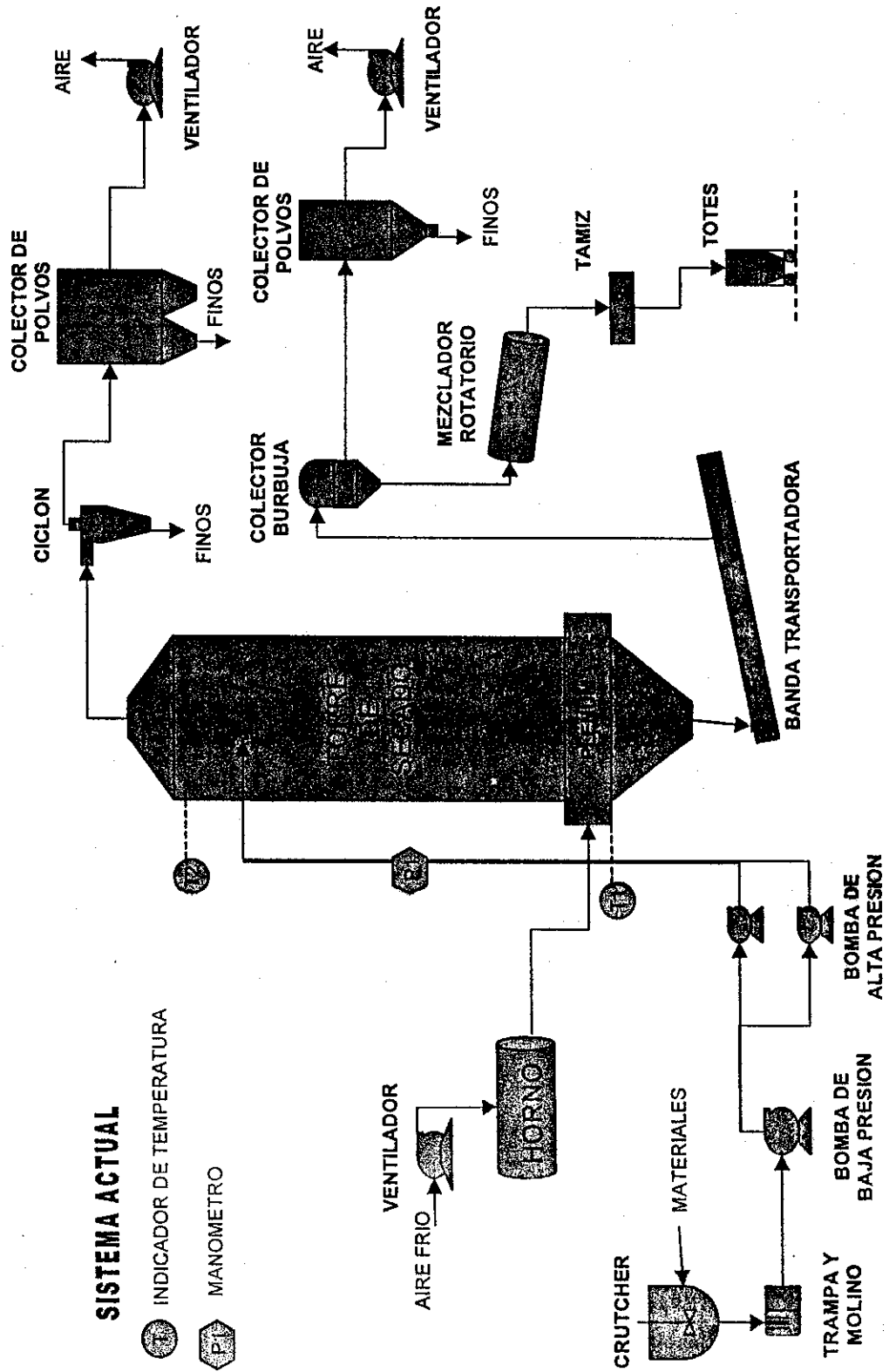
Todo el sistema actual es controlado manualmente por los operadores de las diversas áreas, pero principalmente por el operador de torre, quien tiene a su cargo la coordinación y el funcionamiento del proceso de secado. Él es el que tiene todos los controles del equipo, por lo que es una posición clave, ya que si no se encuentra en su puesto de trabajo o no esta lo suficientemente capacitado para interpretar los diferentes indicadores de presión y temperatura,

se corre un gran riesgo de sobrecalentamiento al no tomarse las acciones correctivas en el momento preciso.

**Densidad y humedad del producto :** dos de los controles más importantes son la densidad y humedad del producto, debido a que son características de calidad en el detergente terminado. La humedad que posee un detergente proviene de la cantidad de moléculas de agua que pueden ser retenidas al hidratarse el tripolifosfato de sodio (STPP), este valor es controlado por el operador de torre por medio de una balanza de humedades, por lo que el debe tomar cada cierto tiempo muestra del producto que esta secando y calcular su humedad; para ajustar la humedad, debe balancear entre la cantidad de pasta y la relación de aire caliente que alimenta al sistema. Así que si desea incrementar la humedad debe bajar la cantidad de calor que se esta administrando a la torre. Esto quiere decir que el operador juega un papel sumamente importante en el control de la humedad de la torre, y si le presta la atención debida puede llegar a crear sobrecalentamientos en la torre.

Por otro lado, y un poco menos critico, el operador de torre debe controlar la densidad del producto final, debido a que su dosificación en el empaque es volumétrico, por lo es necesario mantener un estricto de este parámetro. Éste es calculado con una frecuencia de 5 minutos por un operador, el cual retroalimenta al operador de torre, quien a su vez controla el parámetro, aumentando o disminuyendo la presión de atomización.

**Figura No 2: DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA ACTUAL**



### 3.3.1 Matrices de afinidad

Las matrices de afinidad, son un conjunto de tablas que son utilizadas para estructurar todos los elementos atómicos bajo un mismo tópico, con fines de facilitar su ubicación y poder estructurar de mejor manera una relación lógica entre ellas a través de arboles de falla o diagramas de bloque. Cuando un sistema es muy complejo, existen demasiados elementos atómicos a considerar, esto dificulta el análisis, si no se tiene una herramienta que permita visualizar fácilmente los elementos que deben incluirse, así como su respectiva probabilidad.

En la matriz de afinidad de este estudio, se tienen tres tópicos, los cuales son: Torre (1), Hoen (2) y Colector (3). Éstos fueron seleccionados debido a que se consideran como las partes del proceso donde puede generarse un incendio.

La función de riesgo es considerada como la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia ( $P'o$ ) y la severidad ( $P's$ ). La severidad fue evaluada para cada elemento en una escala de 1 a 5, que corresponde a una severidad mínima, ligera, moderada, seria y crítica, respectivamente. Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia fue determinada en función de una escala de rangos de tiempo de repetición de cada elemento. Esta escala está definida del 1 al 8, y corresponde en forma ascendente a 1 vez cada 20 años (1), 10 años (2), 5 años (3), 2 años (4), un año (5), 6 meses (6), un mes (7) y una semana (8).

# Tabla No 1. MATRIZ DE AFINIDAD

1

P1,i

No	TORRE	Po	Ps	P'o	P's	po*ps
1	ACIDO SULFONICO CON ACEITE LIBRE ALTO	5	2	2.30E-04	0.4	9.1827E-05
2	ACIDO SULFONICO CON INGREDIENTE ACTIVO ALTO	6	2	4.59E-04	0.4	1.8365E-04
3	ERROR DE ANALISIS	7	2	2.75E-03	0.4	1.1019E-03
4	ERROR DE BALANZA EN CRUTCHER	7	3	2.75E-03	0.8	1.6529E-03
5	ERROR DE FORMULACION	5	5	2.30E-04	1	2.2957E-04
6	ERROR OPERADOR CRUTCHER	7	3	2.75E-03	0.8	1.6529E-03
7	ERROR OPERADOR TOBERAS	7	3	2.75E-03	0.6	1.6529E-03
8	ERROR OPERADOR TORRE	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03
9	FALLA AGITADOR CRUTCHER	5	3	2.30E-04	0.6	1.3774E-04
10	FALLA CONTROLES DE OPERACION DEL HORNO	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
11	FALLA DAMPER REGULADOR DE AIRE ENTRADA A VENT. 60 .	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
12	FALLA DE BOMBAS	8	4	1.21E-02	0.8	9.6970E-03
13	FALLA DE HARDWARE/SOFTWARE, PLC	7	2	2.75E-03	0.4	1.1019E-03
14	FALLA DE TERMOCOPLA	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
15	FALLA DOSIFICACION DE LIQUIDOS AL CRUTCHER	7	2	2.75E-03	0.4	1.1019E-03
16	FALLA DOSIFICADORES DE SOLIDOS DEL CRUTCHER	7	2	2.75E-03	0.4	1.1019E-03
17	FALLA ELECTRICA	6	2	4.59E-04	0.4	1.8365E-04
18	FALLA ELECTROVALVULA DE ACIDO SULFONICO	7	3	2.75E-03	0.6	1.6529E-03
19	FALLA MANOMETRO DE BOMBEO	6	4	4.59E-04	0.8	3.6731E-04
20	FALLA PANTALLA DE TERMOCOPLA	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
21	FALLA TABLERO ELECTRICO OPERACION TORRE.	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
22	FALLA VALVULA PNEUMATICA DE ACIDO SULFONICO	6	3	4.59E-04	0.6	2.7548E-04
23	FORMULACION CON INGREDIENTE ACTIVO ALTO	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
24	INEXPERIENCIA DE OPERADOR	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
25	MAL MANTENIMIENTO	3	3	4.59E-05	0.6	2.7548E-05
26	MAL PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE DE TORRE	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03
27	MALA COMUNICACION ENTRE OP. TORRE Y OP. TOBERAS	7	3	2.75E-03	0.6	1.6529E-03
28	MALA ASPERSION DENTRO DE LA TORRE	6	3	4.59E-04	0.6	2.7548E-04
29	MALA COMUNICACION OPERADOR CRUTCHER Y OP. TORRE.	7	3	2.75E-03	0.6	1.6529E-03
30	MALA DISTRIBUCION DE CALOR EN LA TORRE	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
31	NEGLIGENCIA DE OPERADOR DE TORRE	5	5	2.30E-04	1	2.2957E-04
32	OPERADOR DE CRUTCHER NO SE DA CUENTA	6	3	4.59E-04	0.6	2.7548E-04
33	OPERADOR FUERA DE LUGAR DE TRABAJO	8	4	1.21E-02	0.8	9.6970E-03
34	OPERADOR NO LLEVA MUESTRA	8	1	1.21E-02	0.2	2.4242E-03
35	PROCEDIMIENTO DE MEZCLA DE MATERIALES INADECUADO	6	3	4.59E-04	0.6	2.7548E-04
36	REPETIDOS ARRANQUES DE TORRE	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03
37	RESULTADO DE MUESTRA TARDE	8	2	1.21E-02	0.4	4.8485E-03
38	TAPONAMIENTO DE TOBERA	8	4	1.21E-02	0.8	9.6970E-03
39	TOBERAS DAÑADAS	6	4	4.59E-04	0.8	3.6731E-04
40	TOBERAS MAL ARMADAS	6	4	4.59E-04	0.8	3.6731E-04
41	TUBERIA DE PASTA OBSTRUIDA	6	4	4.59E-04	0.8	3.6731E-04
42	TUBERIA DE PASTA ROTA	3	4	4.59E-05	0.8	3.6731E-05
43	FALLA SENSORES DE AUTOMA	3	4	4.59E-05	0.8	3.6731E-05
44	FALLA HARWARE/SOFTWARE DE AUTOMA	2	6	2.30E-05	1	2.2957E-05
45	FALLA CONTROL PERIFERICO AUTOMA	2	4	2.30E-05	0.8	1.8365E-05



## Tabla No II: MATRIZ DE AFINIDAD

2

P2,i

No	HORNO	Po	Ps	P'o	P's	po*ps
1	COMBUSTIBLE ERRONEO	2	4	2.30E-05	0.8	1.8365E-05
2	COMBUSTIBLE FUERA DE ESPECIFICACION	2	4	2.30E-05	0.8	1.8365E-05
3	ΔH COMBUSTION >> ΔH COMBUSTION NORMAL	1	4	1.15E-05	0.8	9.1827E-06
4	ERROR OPERADOR TORRE	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03
5	FALLA COMPUERTA REGULADORA DE AIRE DE COMBUSTION	6	3	4.59E-04	0.6	2.7548E-04
6	FALLA ELECTRICA	6	3	4.59E-04	0.6	2.7548E-04
7	FALLA IGNICIÓN (ENCIENDE CON EXCESO DE QUEROSENO)	7	4	2.75E-03	0.8	2.2039E-03
8	FALLA MECÁNICA	3	3	4.59E-05	0.6	2.7548E-05
9	FALLA PANTALLA DE TERMOCOPLA	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
10	FALLA PNEUMÁTICA	5	3	2.30E-04	0.6	1.3774E-04
11	FALLA REGULADOR DE COMPUERTA DE VENT. 60 HP	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
12	FALLA TERMOCOPLA	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
13	FALLA VENTILADOR DE 60 HP	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
14	FALLA VENTILADOR DE AIRE DE COMBUSTION	4	3	1.15E-04	0.6	6.8871E-05
15	FALLA VENTILADOR DE ATOMIZACIÓN	4	4	1.15E-04	0.8	9.1827E-05
16	GRADUACION DEL REGULADOR DE COMBUSTION ALTO	7	4	2.75E-03	0.8	2.2039E-03
17	INEXPERIENCIA DE OPERADOR	5	4	2.30E-04	0.6	1.8365E-04
18	MAL MANTENIMIENTO	2	2	2.30E-05	0.4	9.1827E-06
19	MAL PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE DEL HORNO	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03
20	NEGLIGENCIA DEL OPERADOR	5	5	2.30E-04	1	2.2957E-04
21	NO CIERRA VALVULA REGULADORA DE COMBUSTIBLE	6	4	4.59E-04	0.8	3.6731E-04
22	NO HAY BOQUILLA DE ATOMIZACIÓN (SE CAE, MAL ESTADO)	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
23	OBSTRUCCION DE DUCTO ENTRADA A PLENUM	3	5	4.59E-05	1	4.5914E-05
24	OBSTRUCCION DE DUCTO VENTILADOR 60 HP	3	5	4.59E-05	1	4.5914E-06
25	OPERADOR FUERA DE LUGAR DE TRABAJO	8	4	1.21E-02	0.8	9.6970E-03
26	PRESION DE COMBUSTIBLE ALTA	8	4	1.21E-02	0.8	9.6970E-03
27	REPETIDOS ARRANQUES DE TORRE	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03

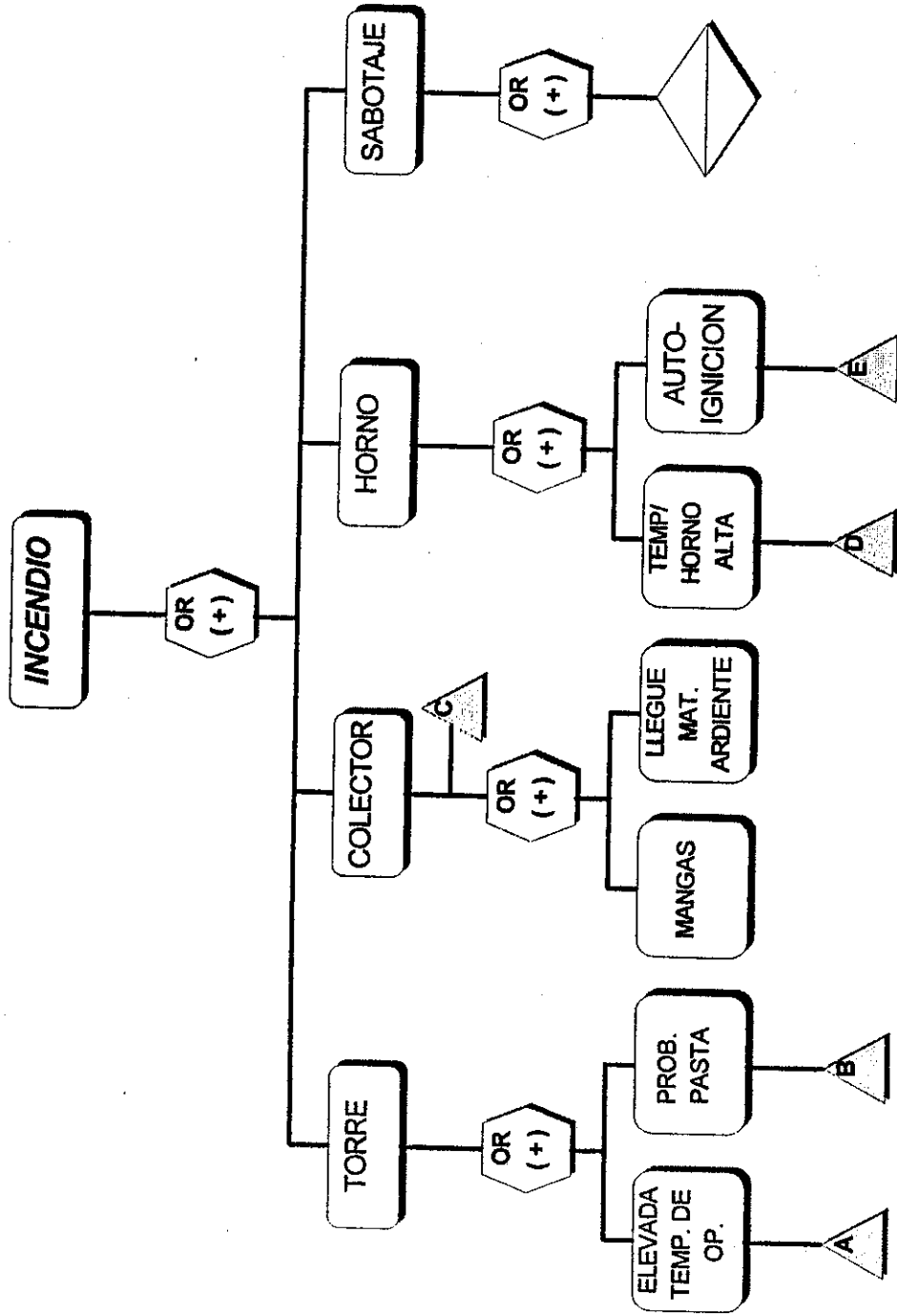
## Tabla No III: MATRIZ DE AFINIDAD

3

P3,i

No	COLECTOR	Po	Ps	P'o	P's	po*ps
1	CONTACTOR DE MOTOR DE 100 HP NO DESCONECTA	3	4	4.59E-05	0.8	3.6731E-05
2	CONTACTOR DE MOTOR DE 60 HP NO DESCONECTA	3	4	4.59E-05	0.8	3.6731E-05
3	ENTRA PRODUCTO A TUYERES	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
4	ERROR OPERADOR TORRE	7	5	2.75E-03	1	2.7548E-03
5	FALLA CONTROL ELECTRICO DE VENTILADOR 100	5	3	2.30E-04	0.6	1.3774E-04
6	FALLA CONTROL ELECTRICO DE VENTILADOR DE 60 HP	5	3	2.30E-04	0.6	1.3774E-04
7	FIN DE VIDA UTIL DE LA MANGA	6	5	4.59E-04	1	4.5914E-04
8	INEXPERIENCIA DE OPERADOR	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
9	MALA CALIDAD DE LAS MANGAS	4	5	1.15E-04	1	1.1478E-04
10	MANGAS ERRONEAS	3	5	4.59E-05	1	4.5914E-05
11	NO SE ACCIONEN LAS PUERTAS DE SEGURIDAD DE LA TORRE	4	3	1.15E-04	0.6	6.8871E-05
12	OPERADOR FUERA DE LUGAR DE TRABAJO	8	4	1.21E-02	0.8	9.6970E-03
13	OPERADOR NO APAGA VENTILADOR	5	4	2.30E-04	0.8	1.8365E-04
14	OPERADOR NO SE DA CUENTA QUE HAY BRASAS	6	5	4.59E-04	1	4.5914E-04

Figura No 3: ÁRBOL DE FALLA GENERAL



### 3.3.3 Calculo de "Cut Sets" (cortaduras mínimas)

Principios de álgebra Booleana:

La aplicación de algunas de estas reglas son utilizadas en los calculos de cortaduras minimas con el fin de simplificar las operaciones y determinar la confiabilidad del sistema.

- 1)  $X + X = X$
- 2)  $X * X = X$
- 3)  $X + XY = X$
- 4)  $X*Y = Y*X$
- 5)  $X + Y = Y + X$
- 6)  $X(Y + Z) = XY + XZ$
- 7)  $(X+Y)*(X+Z) = X +YZ$

PARA EL ÁRBOL DE FALLA DE "PROBLEMA CON LA PASTA"

Prob. Pasta = Mat. Prima + Formulación + Agitación + Dosificación

Del árbol de fallas (B):

Mat. Prima =  $P_{1,1} + P_{1,2}$

Formulación =  $P_{1,5} + P_{1,23} + P_{1,35}$

Agitación = Pauto + Pmanual

$$= (P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13}) + (P_{1,9} + P_{1,6})$$

Agitación =  $P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,9} + P_{1,6}$

aplicando la regla # 1 de álgebra Booleana:

Agitación =  $P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,9} + P_{1,6}$

Entonces:

Agitación =  $P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,6}$

Dosificación =  $P(I.A.>40%) * P(\text{Lab. no identifique})$

$P(\text{Lab. no identifique}) = P_{1,3} + P_{1,34} + P_{1,37}$

$P(I.A.>40%) = \text{PAUTOM} + \text{PMANUAL}$

$$P_{\text{MANUAL}} = P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,14} + P_{1,16} + P_{1,18} + P_{1,22}$$

Aplicando álgebra Booleana :

$$P_{\text{MANUAL}} = P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,14} + P_{1,6} + P_{1,18} + P_{1,22}$$

$$P_{\text{MANUAL}} = P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,18} + P_{1,22}$$

$$P_{\text{AUTOM.}} = (P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,18} + P_{1,22}) * P_{1,32} + P_{1,4} + (P_{1,15} + P_{1,16}) * (P_{1,13} + P_{1,17}) + P_{1,4}$$

$$P_{\text{AUTOM.}} = P_{1,17} * P_{1,32} + P_{1,13} * P_{1,32} + P_{1,18} * P_{1,32} + P_{1,22} * P_{1,32} + P_{1,4} + P_{1,15} * P_{1,13} + P_{1,16} * P_{1,13} + P_{1,15} * P_{1,17} + P_{1,16} * P_{1,17}$$

$$P(I.A > 40\%) = P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,18} + P_{1,22} + P_{1,17} * P_{1,32} + P_{1,13} * P_{1,32} + P_{1,18} * P_{1,32} + P_{1,22} * P_{1,32} + P_{1,4} + P_{1,15} * P_{1,13} + P_{1,16} * P_{1,13} + P_{1,15} * P_{1,17} + P_{1,16} * P_{1,17}$$

Aplicando álgebra Booleana

$$P(I.A > 40\%) = P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,18} + P_{1,22} + P_{1,17} * P_{1,32} + P_{1,13} * P_{1,32} + P_{1,18} * P_{1,32} + P_{1,22} * P_{1,32} + P_{1,4} + P_{1,15} * P_{1,13} + P_{1,16} * P_{1,13} + P_{1,15} * P_{1,17} + P_{1,16} * P_{1,17}$$

Entonces:

$$P(I.A > 40\%) = P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,18} + P_{1,22} + P_{1,17} * P_{1,32} + P_{1,13} * P_{1,32}$$

$$\text{Dosificación} = (P_{1,4} + P_{1,6} + P_{1,16} + P_{1,15} + P_{1,18} + P_{1,22} + P_{1,17} * P_{1,32} + P_{1,13} * P_{1,32}) * (P_{1,3} + P_{1,34} + P_{1,37})$$

$$\begin{aligned} \text{Dosificación} = & P_{1,4} * P_{1,3} + P_{1,6} * P_{1,3} + P_{1,16} * P_{1,3} + P_{1,15} * P_{1,3} + P_{1,18} * P_{1,3} + P_{1,22} * P_{1,3} + \\ & P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,3} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,3} + P_{1,4} * P_{1,34} + P_{1,6} * P_{1,34} + P_{1,16} * P_{1,34} + P_{1,15} * P_{1,34} + P_{1,18} * \\ & P_{1,34} + P_{1,22} * P_{1,34} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,34} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,34} + P_{1,4} * P_{1,37} + P_{1,6} * P_{1,37} + P_{1,16} * \\ & P_{1,37} + P_{1,15} * P_{1,37} + P_{1,18} * P_{1,37} + P_{1,22} * P_{1,37} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,37} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,37} \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Problema con la pasta} = & (P_{1,1} + P_{1,2}) + (P_{1,5} + P_{1,23} + P_{1,35}) + (P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,6}) + \\ & (P_{1,4} * P_{1,3} + P_{1,6} * P_{1,3} + P_{1,16} * P_{1,3} + P_{1,15} * P_{1,3} + P_{1,18} * P_{1,3} + P_{1,22} * P_{1,3} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,3} \\ & + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,3} + P_{1,4} * P_{1,34} + P_{1,6} * P_{1,34} + P_{1,16} * P_{1,34} + P_{1,15} * P_{1,34} + P_{1,18} * P_{1,34} + P_{1,22} * \end{aligned}$$

$$P_{1,34} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,34} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,34} + P_{1,14} * P_{1,37} + P_{1,16} * P_{1,37} + P_{1,16} * P_{1,37} + P_{1,16} * P_{1,37} \\ + P_{1,15} * P_{1,37} + P_{1,18} * P_{1,37} + P_{1,22} * P_{1,37} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,37} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,37}$$

Aplicando álgebra Booleana:

$$\text{Problema con la pasta} = (P_{1,1} + P_{1,2}) + (P_{1,5} + P_{1,23} + P_{1,35}) + (P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,6}) + \\ (P_{1,4} * P_{1,3} + P_{1,6} * P_{1,3} + P_{1,16} * P_{1,3} + P_{1,15} * P_{1,3} + P_{1,18} * P_{1,3} + P_{1,22} * P_{1,3} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,3} \\ + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,3} + P_{1,4} * P_{1,34} + P_{1,6} * P_{1,34} + P_{1,16} * P_{1,34} + P_{1,15} * P_{1,34} + P_{1,18} * P_{1,34} + P_{1,22} * \\ P_{1,34} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,34} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,34} + P_{1,4} * P_{1,37} + P_{1,6} * P_{1,37} + P_{1,16} * P_{1,37} + P_{1,15} * \\ P_{1,37} + P_{1,18} * P_{1,37} + P_{1,22} * P_{1,37} + P_{1,17} * P_{1,32} * P_{1,37} + P_{1,13} * P_{1,32} * P_{1,37}$$

Entonces:

$$\text{Problema con la pasta} = P_{1,1} + P_{1,2} + P_{1,5} + P_{1,23} + P_{1,35} + P_{1,9} + P_{1,17} + P_{1,13} + P_{1,6} + P_{1,4} * P_{1,3} \\ + P_{1,6} * P_{1,3} + P_{1,15} * P_{1,3} + P_{1,18} * P_{1,3} + P_{1,22} * P_{1,3} + P_{1,4} * P_{1,34} + P_{1,6} * P_{1,34} + P_{1,15} * P_{1,34} + P_{1,18} * P_{1,34} \\ + P_{1,22} * P_{1,34} + P_{1,4} * P_{1,37} + P_{1,6} * P_{1,37} + P_{1,15} * P_{1,37} + P_{1,18} * P_{1,37} + P_{1,22} * P_{1,37}$$

Total 24 cortaduras minimas o "Cut Sets" para problema con la pasta.

### 3.3.4 Resumen de cut sets

Las cortaduras mínimas o cut sets del sistema son todas aquellas fallas que si se producen provocan la falla total del sistema, es así que con una de estas que se produzca, puede generarse un incendio. Por lo que el conjunto de todos los cut sets es la probabilidad de falla del sistema total, o en este caso el riesgo total del sistema.

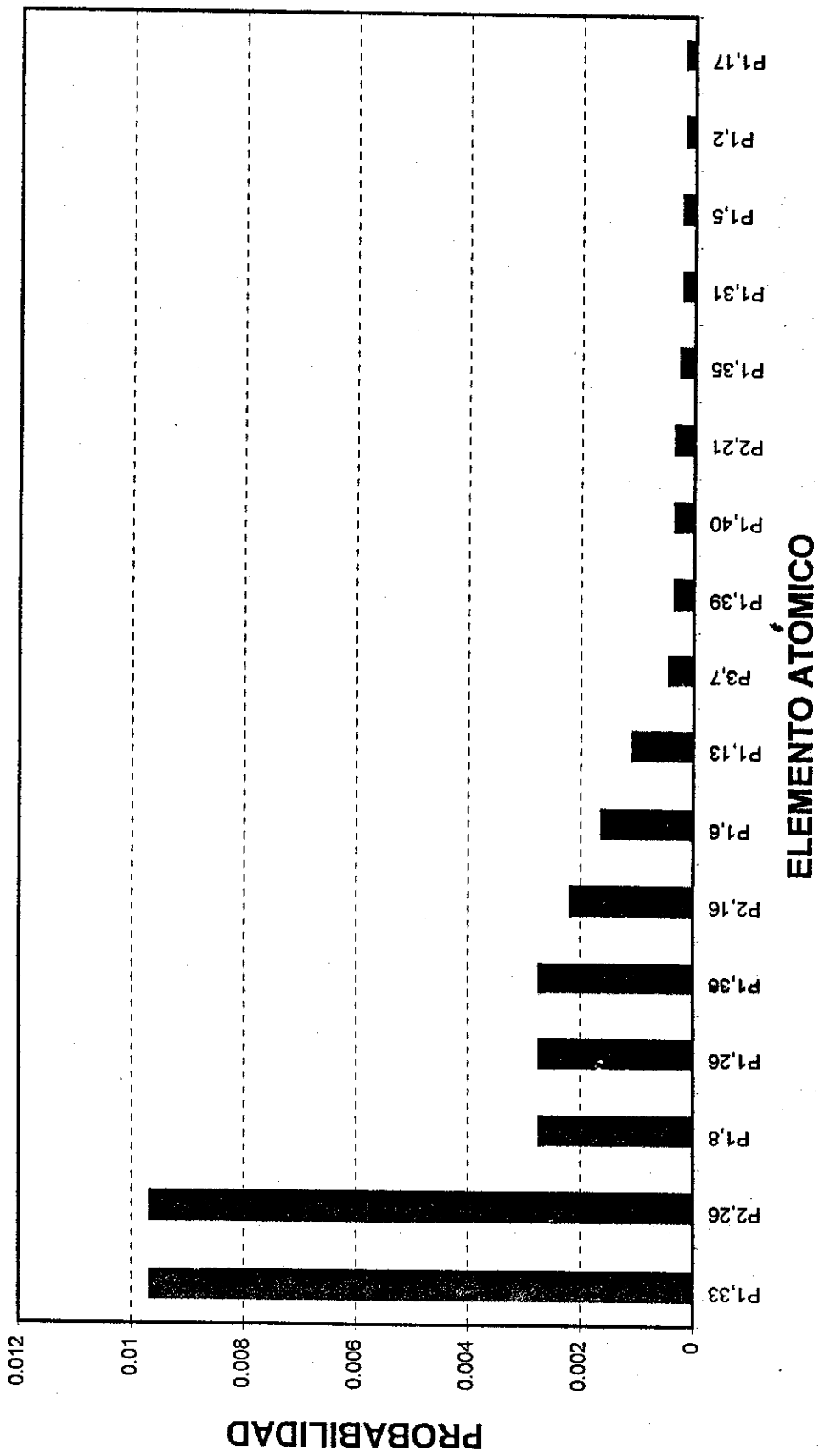
Una cortadura puede ser la falla de un elemento atómico, o la combinación de dos elementos que fallan en el mismo tiempo. Siendo así que si se tiene una cortadura de tipo " $P_{i,j}$ ", significa que es un solo elemento el que tiene que fallar para que el sistema total se incendie, mientras que si una cortadura es " $P_{i,j} * P_{i,k}$ " se refiere a que los dos elementos (j y K) deben fallar al mismo tiempo para producir la falla total en el sistema.

El sistema actual cuenta con un total de 191 cortaduras, lo que significa que tiene muchos elementos de riesgo, pero como se puede apreciar en la tabla de resumen son pocos los elementos que componen el 90% del riesgo total.

Tabla No IV : RESUMEN DE CUT SETS SISTEMA ACTUAL

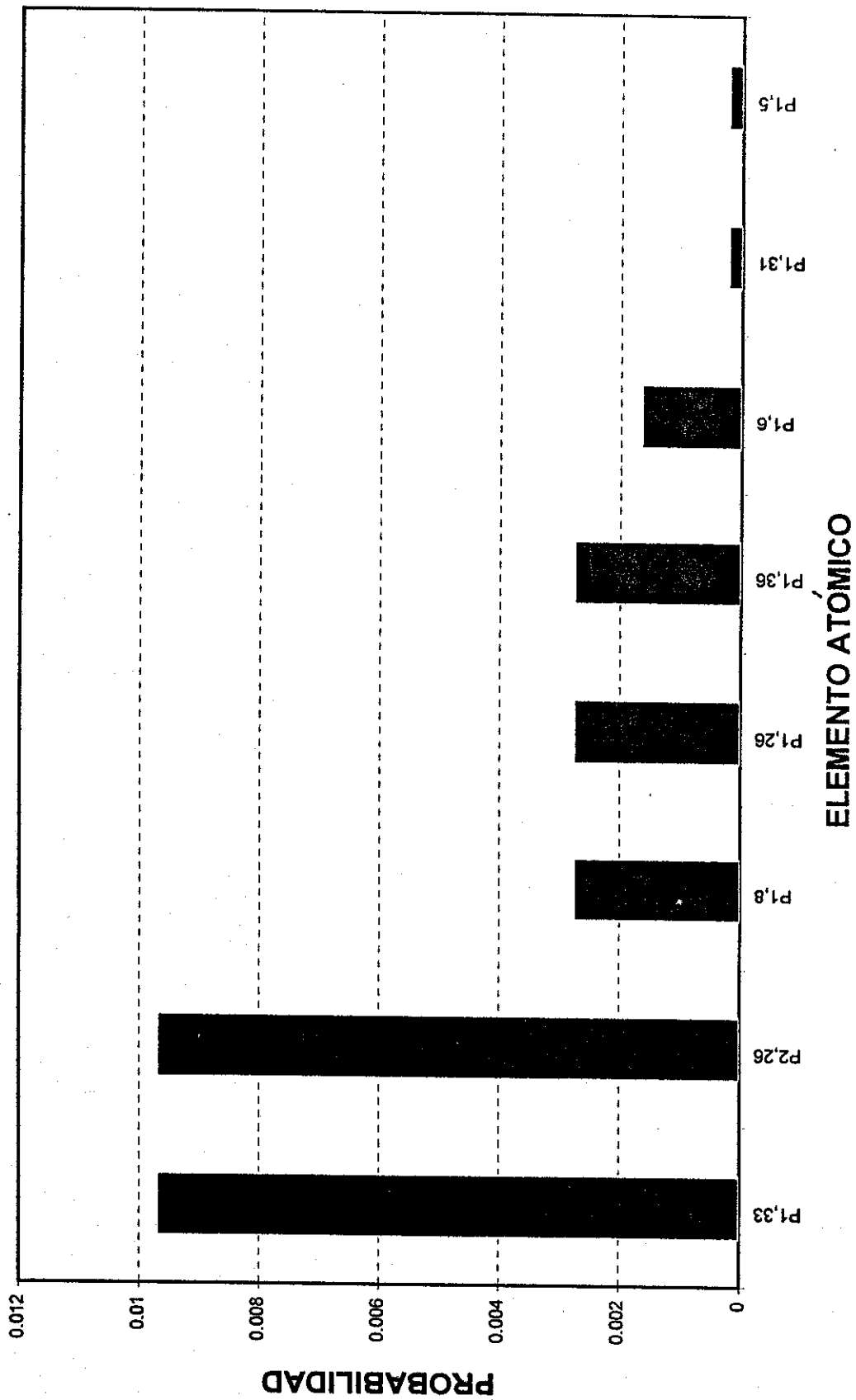
	TÓPICO						TOTAL
	1		2		3		
	TORRE		COLECTOR		HORNO		
Riesgo	0.02415		0.02080		0.01228		0.05723
% Riesgo	2.415		2.080		1.228		5.723%
No de Cut Sets	46		41		104		191
Cut Sets Importantes	P1,33	9.70E-03	P1,33	9.70E-03	P2,26	9.70E-03	
	P1,26	2.75E-03	P1,26	2.75E-03	P2,16	2.20E-03	
	P1,8	2.75E-03	P1,8	2.75E-03	P2,21	3.67E-04	
	P1,36	2.75E-03	P1,36	2.75E-03			
	P1,6	1.65E-03	P3,7	4.59E-04			
	P1,13	1.10E-03	P1,41	3.67E-04			
% incluido en Cut Sets Importantes	85.79%		90.31%		99.94%		90.47%

**Figura No 4 : PARETO DE RIESGO  
CAUSAS GENERALES**



$P_{i,j}$  = Riesgo de falla de topico i, elemento j

**Figura No 5: PARETO DE RIESGO  
CAUSAS DE FACTOR HUMANO**







## 4. ANÁLISIS DEL SISTEMA PROPUESTO

### 4.1 Descripción del sistema propuesto

El sistema actual posee mucha dependencia del operador de torre y como se puede notar en los paretos de causas de incendio en la torre, el factor humano es el que mayor influencia tiene para que se dé un siniestro, es por ello que el sistema que se propone se basa en la automatización del proceso, con la intención de mejorar los controles y crear un sistema más seguro.

El sistema propuesto consta de varios elementos de control y varias acciones que a continuación se describen.

**Control programable:** este equipo es un computador o una unidad lógica programable (PLC, por sus siglas en inglés), el cual consta de una unidad de CPU, con entradas y salidas de dispositivos, sensores o señales de otros equipos que trabajarán como esclavos de esta unidad. Esta parte es esencial para poder automatizar un sistema, debido a que es el cerebro de todo el sistema, y apoyado en un programa adecuado (software), puede llegar controlar de forma segura la operación de la torre. Hoy en día existe gran variedad de equipos para automatizar, por lo que en este documento solo se mencionan las funciones básicas que debe poseer el sistema en el momento de automatizarlo.

**Entradas:** dentro de las señales de entrada al control programable más importantes, se tienen las siguientes:

Temperatura de entrada a la torre (T1)



Temperatura de salida de la torre (T2)  
Temperatura de salida del horno (T3)  
Temperatura de entrada al plenum (T4)  
Temperatura de entrada al colector de polvos (T5)  
Temperatura de salida del colector de polvos (T6)  
Manómetro de presión de pasta en tubería (P1)  
Medidor de flujo de pasta en tubería

**Salidas:** Las salidas del control programables deben ser a:

Variadores de frecuencia de bombas de alta presión  
Control de encendido del horno.  
Regulador de flujo de keroseno.  
Control de encendido de Ventilador de aire frío.  
Damper de ventilador de aire frío.  
Control de encendido de Ventilador de Succión de torre.  
Damper de ventilador de succión de la torre.  
Sistema de toberas

El sistema propuesto posee control directo sobre la regulación del flujo de keroseno y el sistema de apagado del horno, la cantidad de pasta bombeada a la torre, la distribución de la atomización en la torre, y los flujos de aire de entrada y salida de la torre.

El primer punto que controlará el nuevo sistema, es el arranque de la torre, por lo que el cpu recibirá en tiempo real el valor de las señales de las temperaturas (T1 ,T2, T3 y T4), pedirá la acción del operador para accionar el arranque del horno, regulando el flujo de combustible al caudal predeterminado de arranque, luego accionará los ventiladores de entrada y salida del aire a la



torre. Mientras inicia el calentamiento de la torre, avisa al operador sobre la verificación del equipo de bombeo; al llegar a la temperatura de arranque predeterminada, accionará el bombeo, comandando los Variadores de velocidad y controlando la presión de atomización por la señal de un medidor de presión electrónico(P1). Al mismo tiempo, accionará el sistema de toberas, a través del mando a electroválvulas. En este punto, abrirá el número de válvulas de arranque (podrían ser 2), manteniendo la simetría en la torre y dependiendo de las válvulas que el operador tenga seleccionadas como listas.

Los sistemas de distribución de toberas en las torres de secado, pueden ser muy variados en cuanto a la cantidad y al número de niveles de atomización.

El sistema de toberas de la torre analizada, consta de un anillo distribuidor, con seis toberas de atomización colocadas en forma equidistante. Cada tobera tendrá una electroválvula y un indicador de listo, el cual el operador de esta área debe accionar cuando la tobera se encuentre disponible, en caso contrario el cpu no podrá accionar sobre la electroválvula. Todo ello para evitar accidentes en el caso de que se accione la válvula y el operador no la tenga conectada o que en ese momento la este limpiando. El sistema abrirá el primer par de toberas que encuentre disponibles y que tengan simetría en la torre.

A medida como la T2 aumenta, el sistema abrirá tres y luego cuatro toberas, entonces empezará a buscar el equilibrio del secado, ajustando el flujo de combustible dependiendo de la cantidad de agua que se alimenta al sistema, el cual es enviado en tiempo real por medio de un medidor de flujo, como resultado de ello se obtendrá una disminución en valor de T2. El cual no debe quedar bajo un valor mínimo que puede ser preestablecido.



La presión de atomización es medida en todo el tiempo, y en el caso de que repentinamente suba la presión en alguna de las toberas, cambiara inmediatamente a la que se encuentre de repuesto; aunque en el caso de no encontrarse esta lista, desplegará una alarma al operador y automáticamente disminuirá la presión hasta llegar a la presión de atomización.

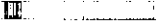
Por otro lado, si en algún momento llega a bajar el flujo de bombeada en la torre, desplegara una alarma al operador y disminuirá el flujo de combustible, evitando con ello un sobrecalentamiento.

El sistema posee varios puntos de acción para evitar incendios, algunos de ellos son:

- Apagado del horno y ventiladores cuando la T1, T2, T3 o T4 estén por arriba de un valor programado de disparo.
- Apagado del horno y ventiladores cuando la T5 o T6 son mayores al valor programado, o encendido del sistema contra incendio en el colector de polvos cuando T6 es mayor que T5 en una cantidad predeterminada.
- El intercambio de toberas, para evitar sobrecalentamiento por disminución de la pasta alimentada, o graduación del flujo bombeado para evitar sobre presiones de bombeo.

Estos tipos de sistemas son capaces de desplegar toda la información del proceso en un monitor, en forma gráfica, para que el operador pueda tener





mayor información sobre el proceso, y además le proporcione las alarmas debidas para que pueda tomar oportunamente las acciones respectivas.

Este sistema puede ser iterativo con el operador de tal manera que los cambios que él desee efectuar puedan realizarse, siempre y cuando se encuentren dentro de los límites de seguridad programados en el sistema. Todo ello puede hacer que el proceso trabaje más eficientemente y con menor riesgo.



**Figura No 6: DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA PROPUESTO**

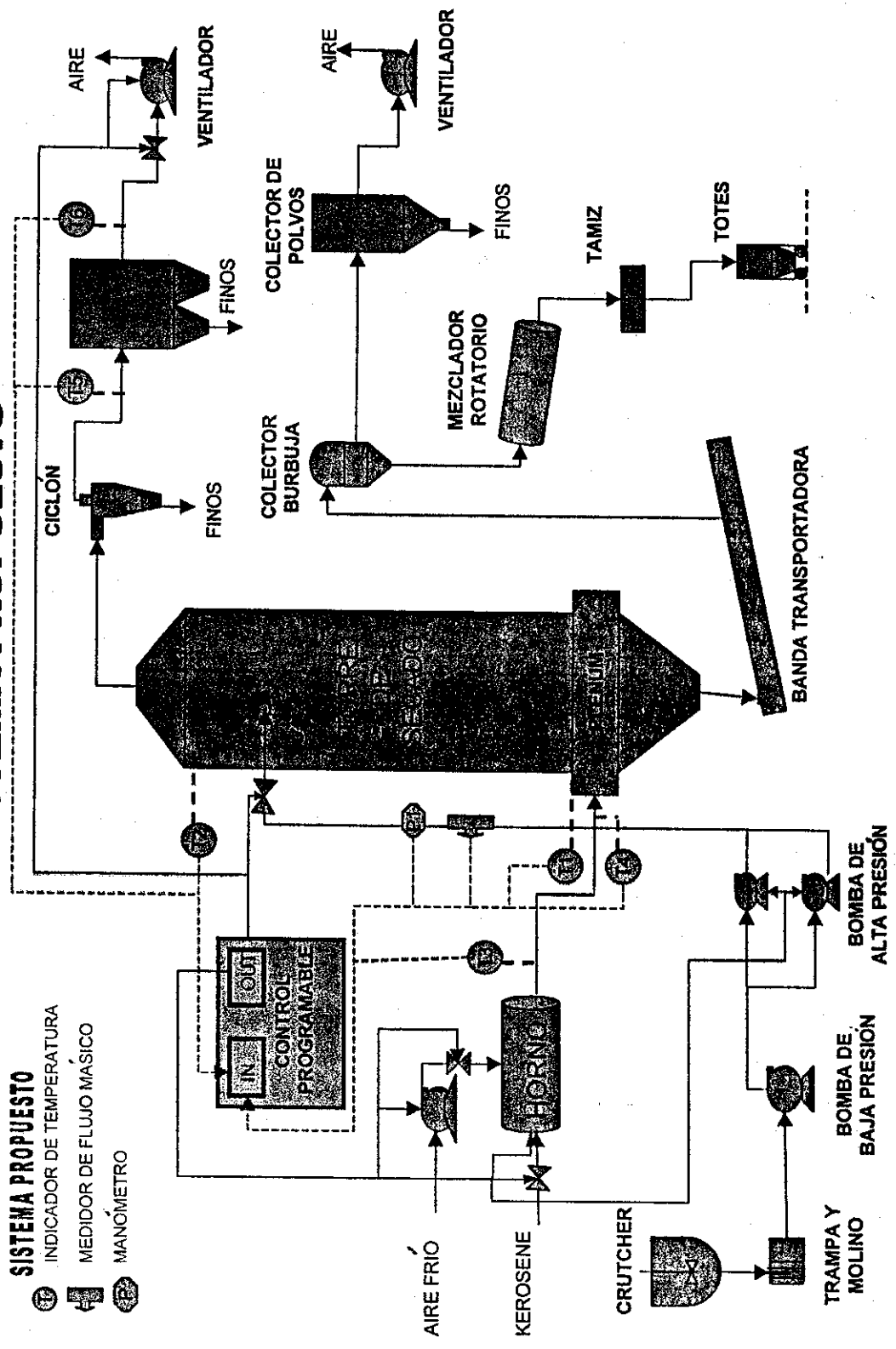
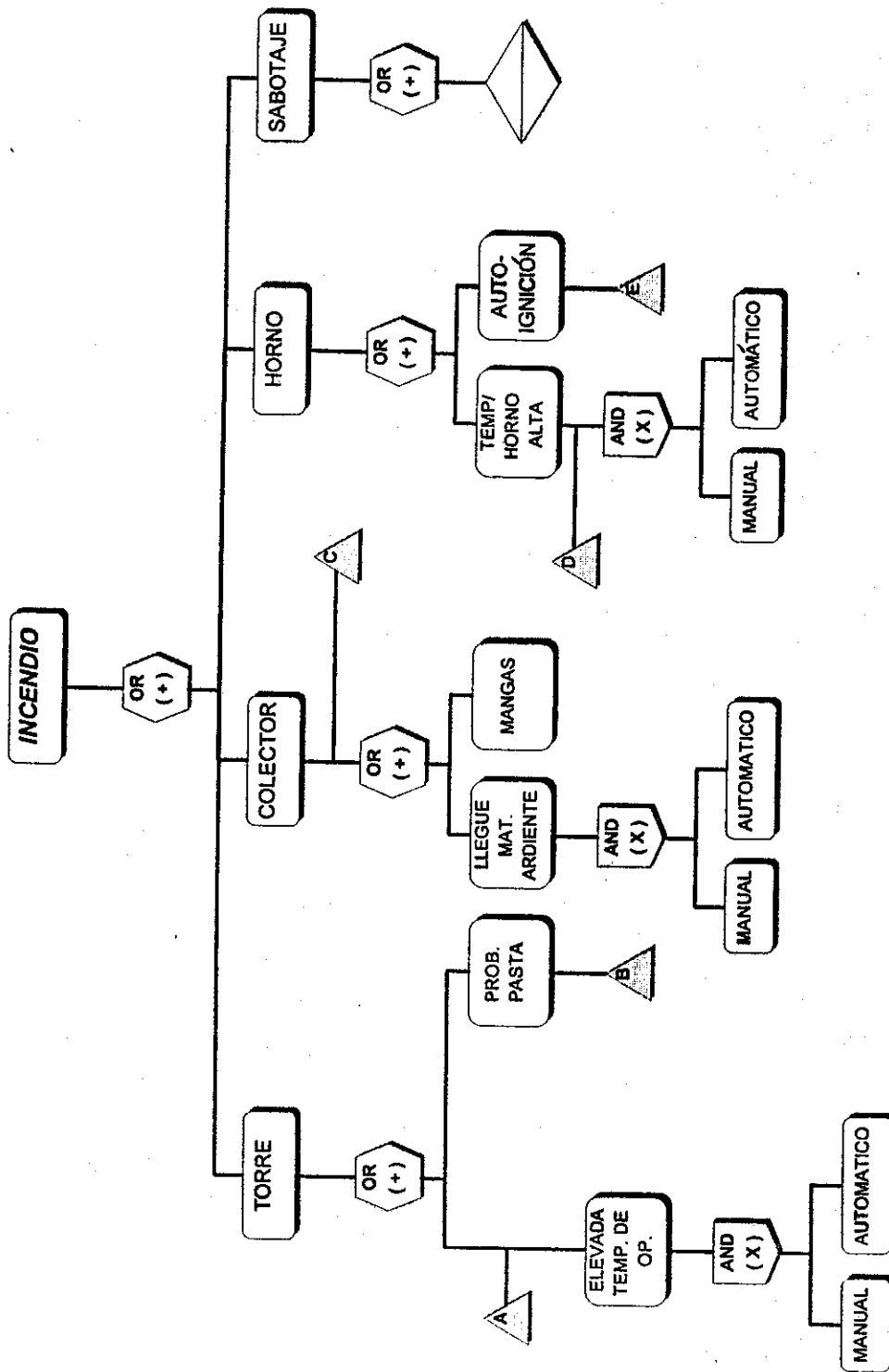




Figura No 6: ÁRBOL DE FALLA GENERAL





### 4.3.2 Resumen de cut sets:

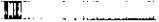
En el sistema propuesto no se reduce el numero de cortaduras mínimas en comparación con el sistema actual, pero el riesgo del sistema se reduce notablemente (92%), esto debido a que se elimina el riesgo de los elementos atómicos que tenían mayor contribución. Es por ello que si se comparan los cut sets de la tabla V y la tabla IV, que representan las cortaduras de mayor riesgo, en su mayoría han cambiado.

Otro factor importante de mencionar es que en el sistema propuesto, pese a tener 191 cortaduras, que pueden producir la falla total del sistema, solamente 11 de ellos conforman el 92.31% del riesgo total del nuevo sistema, el cual es 99.545% confiable.

Tabla No V: RESUMEN DE CUT SETS SISTEMA PROPUESTO

	TOPICO						TOTAL
	1		2		3		
	TORRE		COLECTOR		HORNO		
Riesgo	0.00393		0.00062		9.581E-07		0.00455
% Riesgo	0.393%		0.062%		0.000%		0.455%
No de Cut Sets	46		41		104		191
Cut Sets Importantes	P1,6	1.65E-03	P3,7	4.59E-04	(P1,43+P1,44+P1,45)*P2,26	7.57E-07	
	P1,13	1.10E-03	P3,9	1.16E-04	(P1,43+P1,44+P1,45)*P2,16	1.72E-07	
	P1,35	2.75E-04	P3,10	4.59E-05			
	P1,5	2.30E-04					
	P1,2	1.84E-04					
	P1,9	1.38E-04					
% Includido en Cut Sets Importantes	91.13%		99.75%		96.95%		92.31





## 5. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN

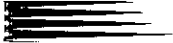
### 5.1 Tablas de resultados

Tabla No VI: DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA.

	SISTEMA ACTUAL RIESGO	SISTEMA PROPUESTO RIESGO
TORRE	2.42%	0.39%
COLECTOR	2.08%	0.06%
HORNO	1.23%	0.000096%
<b>TOTAL SISTEMA</b>	<b>5.73%</b>	<b>0.45%</b>
<b>CONFIABILIDAD</b>	<b>94.27%</b>	<b>99.55%</b>

Tabla No VII: DETERMINACIÓN DEL RIESGO POR FACTORES HUMANOS.

FACTORES HUMANOS	CUTSET	RIESGO	%SOBRE TOTAL	%ACUMULADO
Operador fuera de lugar de trabajo	P1,33	0.00967	26.14%	26.14%
Presión de combustible alta	P2,26	0.00967	26.14%	52.28%
Error operador de Torre	P1,8	0.00275	7.43%	59.70%
Mal procedimiento de arranque de Torre	P1,26	0.00275	7.43%	67.13%
Repetidos arranques de Torre	P1,36	0.00275	7.43%	74.55%
Error de operador de Crutcher	P1,6	0.00165	4.46%	79.01%
Negligencia de operador de torre	P1,31	0.00023	0.62%	79.63%
Otros de factor Humano	-----	0.00033	0.88%	80.51%
<b>TOTAL POR FACTORES HUMANOS</b>		<b>0.02987</b>	<b>80.51%</b>	



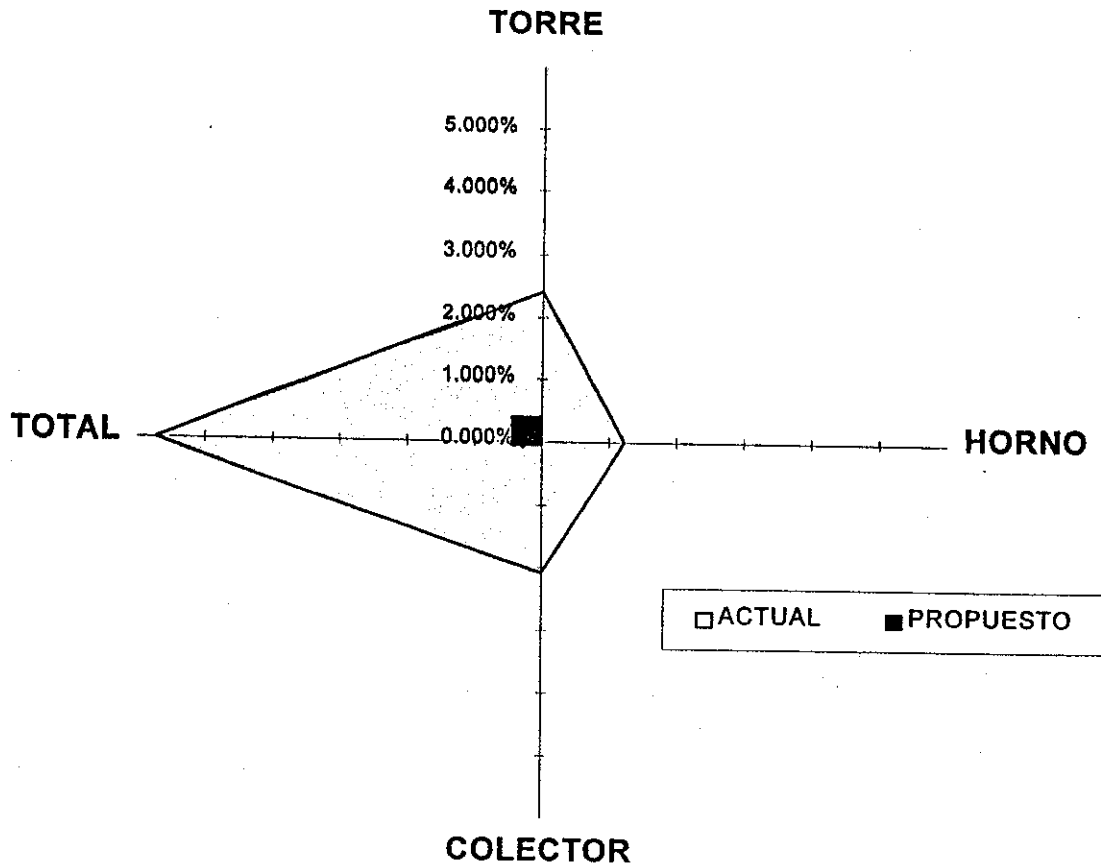
7  
6  
5



## 5.2 Diagrama de Griffin

El diagrama de Griffin es un gráfico con diferentes planos, donde regularmente se toman los planos de cada uno de los tópicos tratados en el problema, es así que para esta evaluación se presenta un gráfico de cuatro planos, siendo ellos los tres tópicos del sistema y el último el sistema total. En este gráfico se aprecia en color gris la condición de riesgo del sistema actual, mientras en color negro se gráfica el riesgo del sistema propuesto, así pues, la diferencia entre las áreas gris y negro representan el impacto de las acciones tomadas y el aumento de la confiabilidad del sistema propuesto.

**Figura No 8: DIAGRAMA DE GRIFFIN**





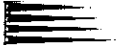
### 5.3 Discusión de Resultados

La función de riesgo, se caracteriza por ser una relación entre la probabilidad de ocurrencia y la severidad; es decir, que la interpretación del riesgo en un elemento, no es más que la relación entre que ocurra la falla y que a su vez tenga una influencia grande en provocar un siniestro. Así la función de riesgo para cada elemento esta dada de la siguiente forma:

$$R = P_o * P_s.$$

Las probabilidades de ocurrencia y de severidad, fueron evaluadas por un método conocido como juicio experto, en donde se consulta a expertos en el proceso de elaboración de detergente y por medio de su experiencia se establecen las probabilidades. El promedio de los valores dados por los expertos, se presentan en la matriz de afinidad (ver anexos), donde también se calcula el riesgo de cada elemento. Estos elementos son todas las posibles causas y son conocidos como elementos atómicos.

La matriz de afinidad presenta tres grandes áreas, las cuales son: torre, colector y horno. En cada una de ellas se puede encontrar los diferentes elementos atómicos que pueden llegar a generar un incendio, pero no expresa la relación que puede existir entre dos o más elementos. Es por ello que es necesaria la construcción de un gráfico conocido como árbol de fallas, donde se plasma la relación lógica que tiene cada elemento en el sistema. En el momento en que se produce una falla en un elemento atómico, se puede visualizar en este diagrama como puede afectar en el sistema completo. Así que si se analiza el sistema de arriba hacia abajo, este muestra como es que puede suceder; por ejemplo, ¿cómo se puede generar un incendio en la torre? Por elevada temperatura de operación o por problema con la pasta. Por otro



lado, si el diagrama se analiza de la parte baja hacia arriba, nos contesta la pregunta ¿por qué?.

En el árbol de fallas se puede notar que se dividió primero en cuatro grandes tópicos, torre, colector, horno y sabotaje. Pero de ellos solo el último no se tomó en cuenta y su incidencia se deja para que pueda ser estudiado posteriormente.

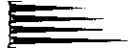
Lo importante del árbol de fallas es no solo plasmar de forma gráfica la incidencia de cada uno de los elementos atómicos en el sistema global, sino que también poder establecer numéricamente la confiabilidad del sistema. Para ello se utiliza un método conocido como cortaduras mínimas (Cut Sets), el cual es descrito en la sección de calculo de muestra. Este método calcula la probabilidad de los eventos, relacionando los elementos según se encuentren en el árbol de fallas. Por ejemplo, para que se dé un incendio en todo el sistema, puede fallar la Torre o el Colector o el Horno. Esta condición "o" equivale a una unión de probabilidades, por lo que la probabilidad de que falle el sistema es la suma de las probabilidades.

$$P(\text{Incendio})= P(\text{Torre})+P(\text{Horno})+P(\text{Colector})$$

Pero cuando la condición indica que para que algo suceda deben fallar dos elementos al mismo tiempo, se produce una condición "Y", que equivale a una intersección. Y como son eventos independientes, el valor de la probabilidad se encuentra dado por la multiplicación de las probabilidades de sus elementos.

El calculo de todo el sistema es sencillo, aunque algo engorroso, por lo que es necesario simplificar aplicando los principios de álgebra Booleana, los cuales se describen en el calculo de muestra. El resultado de esta

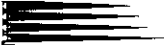




simplificación es una suma de probabilidades, en la que a cada miembro de la suma se le conoce como cortadura mínima (Cut set) y lo cual significa que con una de las cortaduras que se produzca (es decir fallen sus elementos) el sistema total falla.

Una de las mejores formas para reducir el riesgo es la eliminación de algunas cortaduras, pero en sistemas como el que aquí se analizó, esto es muy difícil, ya que no se puede eliminar algún equipo o paso en el proceso, por ejemplo si se sabe que el horno es una cortadura y que tiene una probabilidad alta de falla, no se puede decidir eliminar el horno; pero lo que si se puede realizar es el disminuir su probabilidad. La mejor forma para reducir el riesgo cuando no se puede eliminar el elemento es cambiar las condiciones "o" por "y" en la relación de los elementos. Esto es, que si se tiene probabilidad alta en falla del horno, puede ponerse un sistema que monitoree su comportamiento y haga los ajustes cuando sea necesario, esto obliga a que para que se dé la falla, tiene que fallar el horno "y" que también falle el sistema que monitorea.

En la sección de anexos se tabulan todas las cortaduras (Cut Sets) con su respectiva probabilidad; además, para el sistema actual, se unieron todos y se paretizaron en orden de mayor riesgo. Lo que se obtiene de esto es una gráfica que indica cuales causas son las que deben ser atacadas para disminuir el riesgo, también se paretizaron las causas que son por factores humanos, es decir que tienen en alguna manera que ver con la intervención de los operadores en el proceso. Como se puede observar, tanto en los paretos como en la tabla No 2 de Resultados, las causas por factores humanos son el 80.51% del total del riesgo en el sistema. Esto comprueba que la dependencia del factor humano en la operación de este proceso es el factor predominante



E  
C  
S

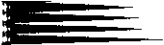


1  
2  
3

para la generación de un incendio. Es por ello que la manera de disminuir el riesgo, es por medio de la automatización de las partes claves del proceso.

Como se puede observar en la sección de resultados en la tabla No 1, donde se determina la confiabilidad, el sistema actual posee un riesgo de incendio de 5.73%, el cual esta conformado por un 2.42% de riesgo en la torre, 2.08% en el colector y 1.23% en el horno. Por otro lado, la función complemento del riesgo es la confiabilidad del sistema, por lo que al evaluar el riesgo podemos saber automáticamente cual es la confiabilidad. Es así que para el sistema actual se tiene una confiabilidad de 97.27%. Este valor de confiabilidad indica que el sistema actual es bastante confiable, por lo que no es un sistema que se incendie todos los días, pero tampoco quiere decir que sea muy poco probable el que ocurra un siniestro, por otro lado, debido al gran impacto que produciría un incendio, es justificable el realizar mejoras en el sistema.

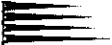
El mismo análisis que se realizó para el sistema actual, fue aplicado al proceso automatizado, con lo que se obtuvo un aumento de la confiabilidad del sistema a un 99.55%, como se aprecia en la tabla No1, esto debido a una reducción del riesgo de 2.42% a 0.39% en la torre, de 2.08 a 0.06% en el colector y de 1.23% a  $9.6 \times 10^{-5}\%$  en el horno. Este nuevo sistema establece una mayor garantía para evitar incendios en el proceso. El impacto de la mejora se puede apreciar en el gráfico de Griffin (Anexos) donde se tiene en el área externa (amarillo) el área de posibles fallas con el sistema actual, y en la parte interna (azul) el área de falla del sistema automatizado. La reducción del riesgo es cerca de 92%, por lo que se puede concluir como un diseño exitoso.



Como se puede observar en la tabla No2 de resultados o en los paretos, los dos factores de mayor incidencia en el riesgo son: Operador fuera de su lugar de trabajo y operador mantiene la presión de combustible alta.

Una de las funciones de la automatización debe ser el proporcionar alarmas suficientes para que el operador pueda verificar una anomalía en el proceso, pero también debe ser capaz de tomar una acción (como el apagado del proceso) cuando no recibe una retroalimentación de la acción del operador, ya que con ello debe interpretar que el operador no se encuentra en su área. Por ejemplo, si se llega a obstruir una tobera, la presión del sistema aumenta, pero podría aumentar la temperatura si la cantidad de pasta que entra a la torre disminuye; el sistema debe dar una alarma para que el operador se entere de lo que pasa, pero al mismo tiempo debe abrir la tobera de repuesto y cerrar la que tuvo la falla, indicándole al operador que debe revisar dicha tobera. De esta manera no solo se da aviso, sino que se toma una acción preestablecida.

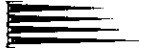
Por otro lado, la segunda falla en importancia es que el operador mantiene alta la presión del combustible, esto quiere decir que utiliza más combustible del que debería de utilizar, como consecuencia de ello, se puede producir un sobrecalentamiento en la torre, así como un desperdicio en calor, lo cual no es productivo. Por lo que este sistema automático puede ir balanceando el proceso, en busca de hacerlo más productivo, esto a través de un programa que le permita optimizar el proceso a partir de las señales de control. Es por ello que en la sección de anexos se presenta una serie de hojas de balance a diferentes tasas (rates, kg/h) de secado de detergente, lo cual permitirá que el control programable despliegue al operador, en tiempo real, como se encuentran las condiciones del proceso y cuales deberían ser las óptimas,



esto puede ayudar significativamente en la búsqueda por el mejoramiento continuo del proceso de secado de detergente.

La forma como debe funcionar un sistema automatizado en este proceso se describe en la sección de Sistemas de Operación, pero vale la pena mencionar que el beneficio de la automatización de este proceso no solo es la minimización del riesgo de incendio, sino que también aporta beneficios en productividad, mejora la calidad del producto y por supuesto controla de forma más eficiente el proceso de secado. En los diagramas de flujo se puede observar las modificaciones del sistema actual, el cual carecía de suficientes puntos de control. También se indica el lugar donde son instalados los nuevos controles de proceso, así cómo la forma en que el automa controla las distintas variables por medio de sus señales de salida hacia los diferentes equipos.



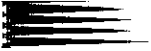


## CONCLUSIONES

1. La automatización del proceso de secado de detergente reduce el riesgo de incendio de 5.73% a 0.45%, a través de la disminución de la dependencia del factor humano en el proceso. Incrementando, con esto, la confiabilidad del sistema a 99.55%.
2. El 80.51% del riesgo total de incendio en el proceso de secado de detergentes proviene de factores de tipo humano.
3. Después de automatizar el proceso de secado de detergentes, la torre es el de mayor riesgo con 0.39%, le sigue el colector con 0.06% y el componente más seguro es el horno con 0.000096% de riesgo de incendio.
4. Las dos causas de mayor impacto en la confiabilidad del sistema total son: *el operador se encuentra fuera de su lugar de trabajo; y el operador mantiene el flujo del combustible por arriba del valor teórico.*
5. A través del análisis de arboles de falla y el método de cortaduras mínimas, sí es posible establecer todas las relaciones existentes entre los componentes que poseen riesgo de incendio, así como evaluar su impacto en el riesgo total del sistema.
6. El riesgo de incendio en la torre aumenta en la medida en que se disminuye el número de toberas con las que se atomiza.



7. La automatización del proceso reduce el riesgo de sobrecalentamiento de la torre, al ajustar el flujo de combustible con relación a la cantidad de toberas que se encuentren trabajando y al flujo de detergente que se está secando.
8. Cuanto más grande es la figura en el gráfico de Griffin, mayor es el riesgo del sistema.



## RECOMENDACIONES

1. Para disminuir el riesgo de incendio del proceso de secado de detergentes. Es necesario automatizar los controles de operación de la torre de secado, siguiendo los lineamientos que se proponen en esta tesis; en cuanto a la forma como deben ser controladas por el autómata, las distintas variables de proceso.
2. El diseño de automatización del sistema de secado de detergente, que se presenta en esta tesis está limitado al tipo y función de los controles de proceso que este debe tener, por lo que es necesario realizar de un estudio sobre el diseño del equipo, así como la programación e instalación del mismo.
3. Una de las probables causas de incendio en el proceso de secado de detergentes es el sabotaje, tal como lo muestra el árbol de fallas del sistema; aunque para efectos de evaluación del riesgo total, no fue considerada su incidencia, por lo que se sugiere la elaboración de un estudio al respecto.
4. El análisis realizado no contempla la sustitución de los equipos como una forma de disminución del riesgo; es decir, que no trata de disminuir la probabilidad de ocurrencia de cada elemento, al utilizar un remplazo por un elemento más confiable, basándose únicamente a establecer un sistema más seguro. Si se recomienda la sustitución de equipo o un sistema de mantenimiento para mejorar la confiabilidad de cada elemento y disminuir el riesgo del sistema total.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Richard Felder & Ronald Rousseau, **Principios básicos de los procesos químicos**. (México DF: Editorial El Manual Moderno, 1981). p. 136
2. Colgate Palmolive división Latinoamericana, **Manejo de Líquidos Inflamables**. Manual de curso corporativo. Venezuela 1995.
3. Compton's. **Interactive Enciclopedia**. CD Enciclopedia Interactiva. 1995
4. Colgate Palmolive división Latinoamérica, *op. cit.*
5. National Fire Protection Association, **Flammable and Combustible Liquids Code Handbook**. ( Estados unidos de América: 1984). p.11-12
6. *Loc. cit.*
7. Textil Filter, "**Propiedades Químicas y Térmicas de los Principales Productos**". Folleto técnico. p. 7
8. Archie Marsicovetere, **Estudio de la operación del secado de detergentes por aspersión en proceso continuo**. Tesis Ingeniería Química. p. 3
9. *Ibid.*, p. 6
10. Neinz Viehwer, **Calculo de torres de secado por pulverización**. (Alemania: Traducido al español por O. Wagner, 1959). p. 2
11. The soaps and detergents association, "**Soaps and Detergents**". (Estados Unidos de América: primera edición, 1991). p. 44
12. *Loc. cit.*
13. *Ibid.*, p. 53



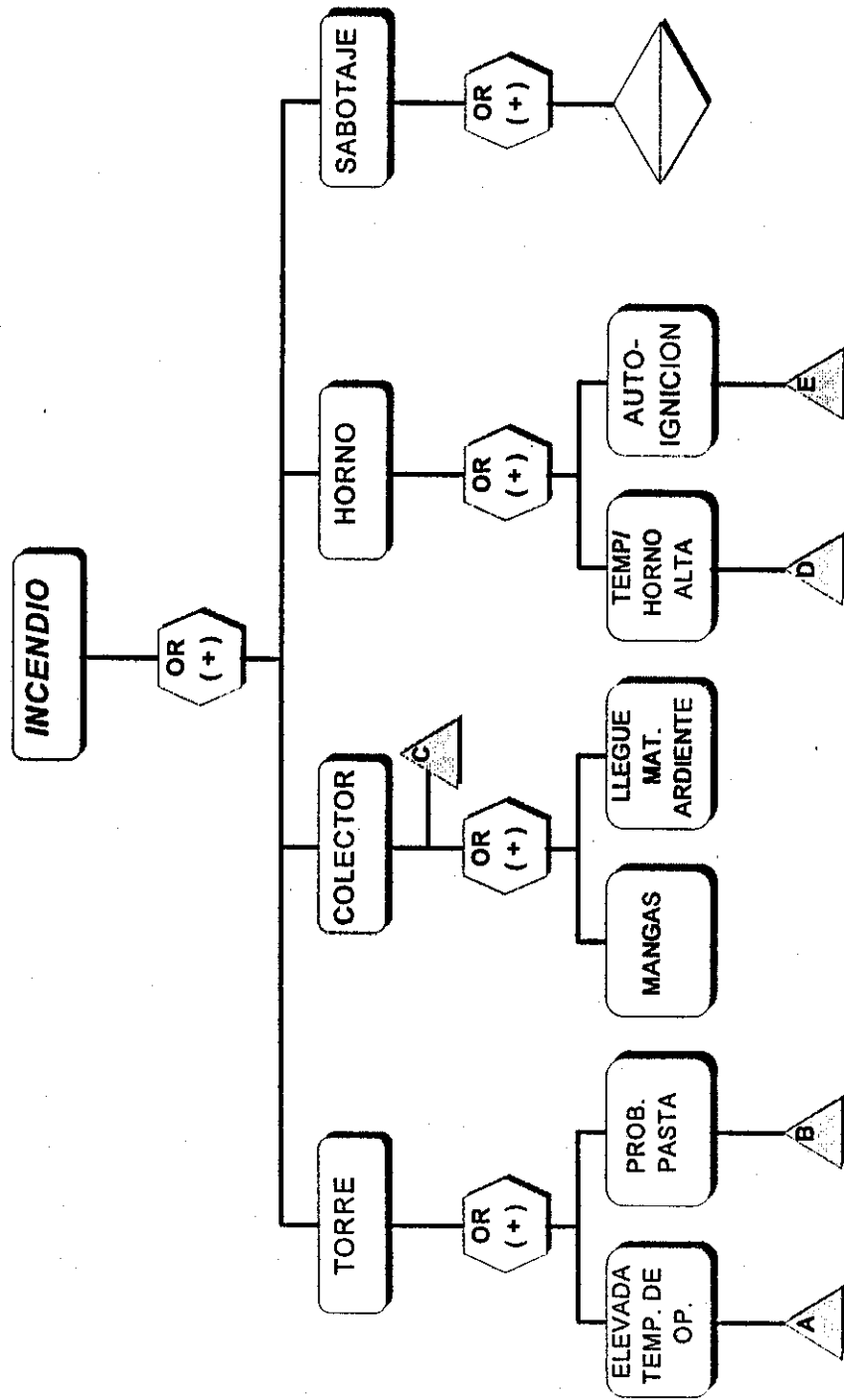


## BIBLIOGRAFÍA

1. Allen-Bradley, **"SLC 500 Family of small programmable controllers (system overview)"**. Folleto técnico. Estados Unidos de América. 1992
2. Allen-Bradley, **"Highly functional operator interface for the SLC 500 processors"**. Boletín 2707. Estados Unidos de América. 1992.
3. Allen-Bradley, **"Operator interface / work station for the Allen-Bradley slc 500 programable controller"**. Hoja de datos 0006.1 Estados Unidos de América. 1991.
4. Colin A. Houston & Associates, **The current state of the art of detergent spray drying**. Estados Unidos de América, Reporte especial para Colgate Palmolive.
5. Donal Kern, **Procesos de transferencia de calor**. Mexico D.F.: ed. Continental, 1989.
6. Emir Ibarra, **Nociones de fiabilidad**. Buenos Aires, Argentina: ed. Marymar, 1976
7. Grimaldi J. & Simonds R. **La seguridad industrial**. Estados Unidos de América: ed. Representaciones y servicios de ingeniería S.A., 1ª ed. en español. 1979
8. Ingeniería Química, **"Ingeniería, construcción, operación y mantenimiento de plantas industriales"**. revista mensual, año XXI tomo 247. Madrid, España: ed. Overo hnos. S.A.. 1989
9. Mohammad Mokarres. **What every engineer should know about reliability and risk analysis**. Estados Unidos de América: ed. Marcel Decker inc., 1984.
10. Moore. **"Instrumentos y sistemas para control de procesos"**. Boletín BL002294. Mexico D.F.
11. Robert Perry & Cecil Chilton. **Manual del ingeniero químico**. Mexico D.F.: ed. McGraw-Hill, 5ª ed. 1987

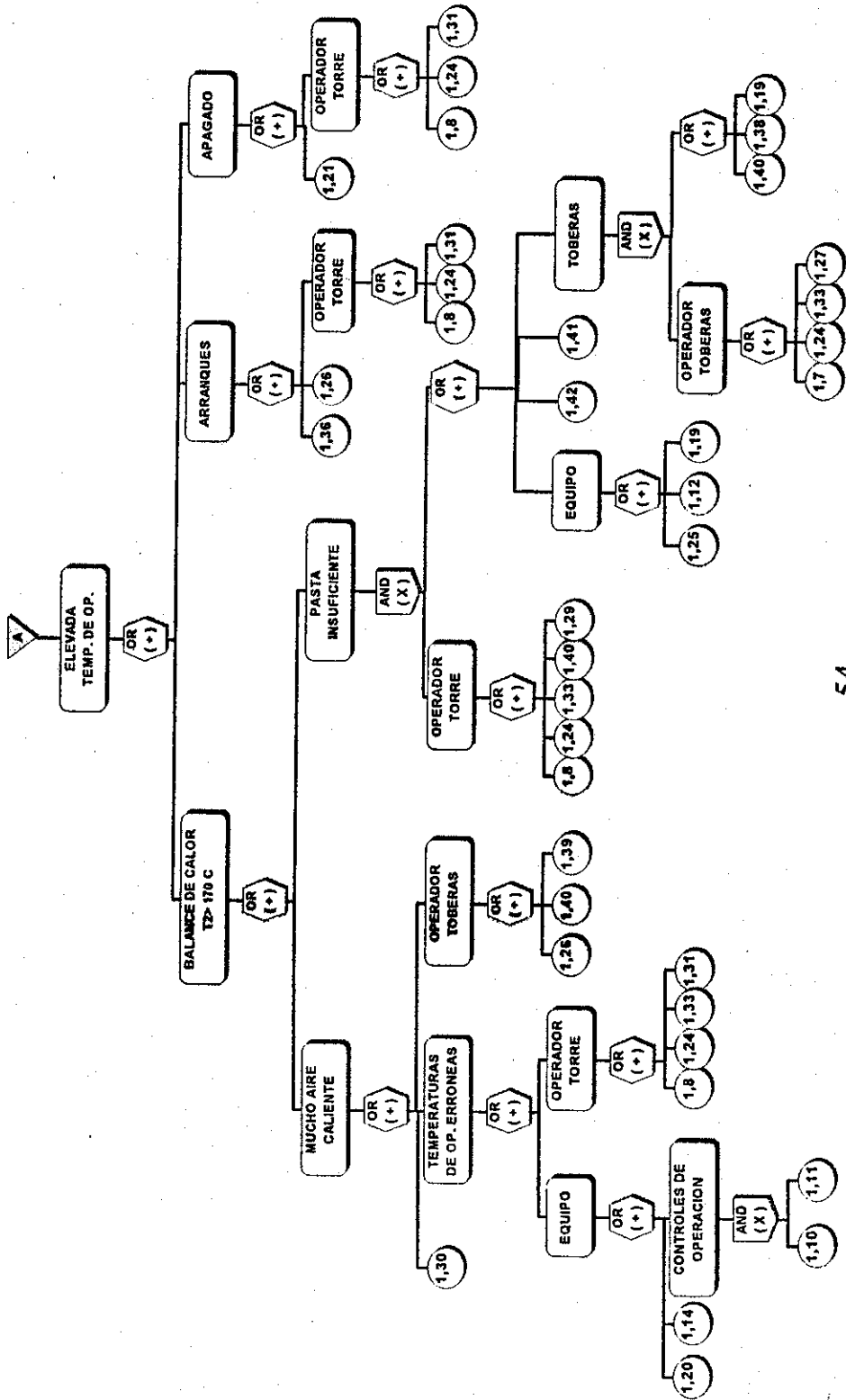


Apéndice A  
 Figura No 9: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA ACTUAL  
 (INCENDIO)



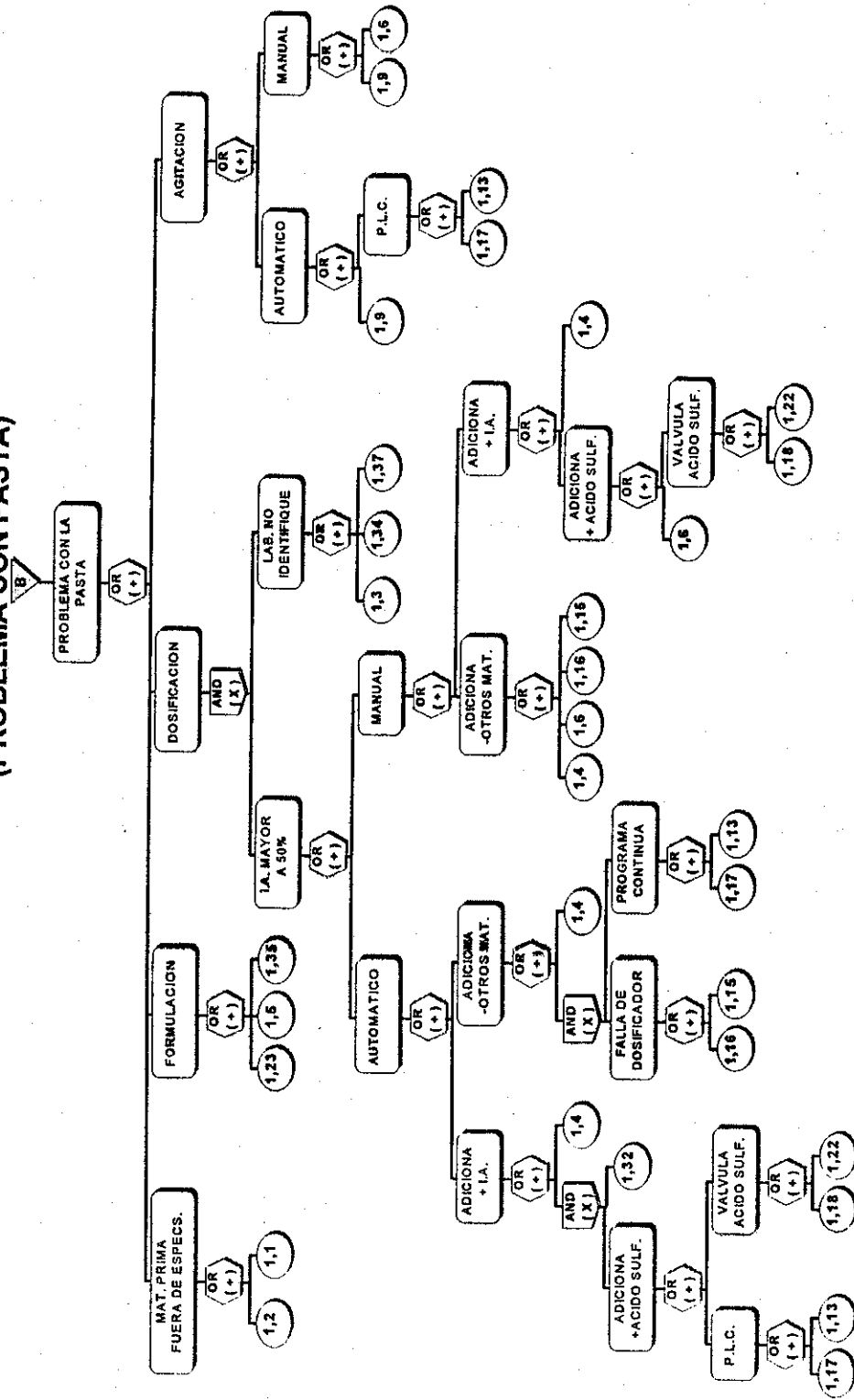


Apéndice A(Continuación)      Figura No 10: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA ACTUAL  
(ELEVADA TEMPERATURA DE OPERACIÓN)





Apéndice A(Continuacion) Figura No 11: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA ACTUAL  
(PROBLEMA CON PASTA)

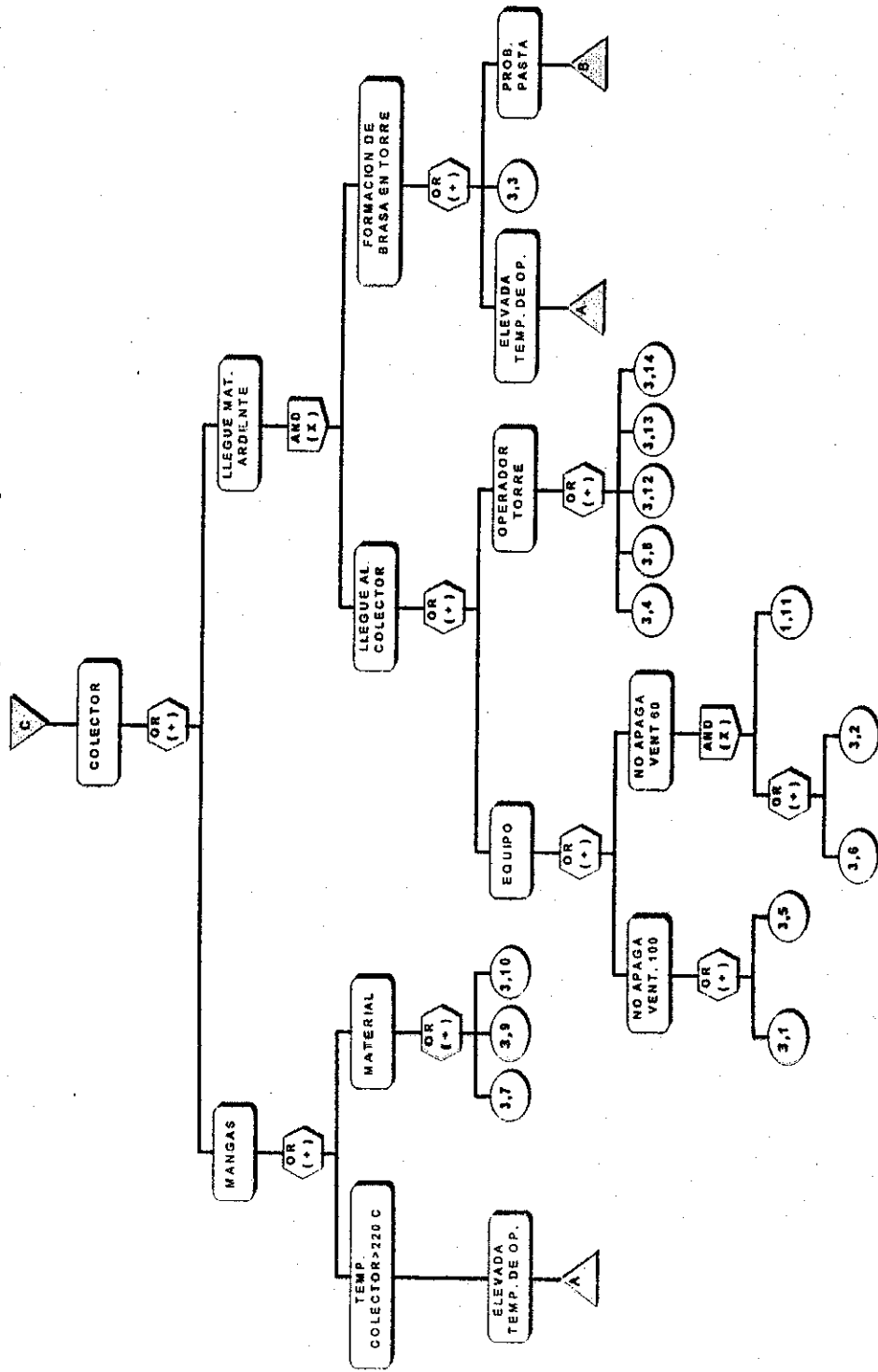






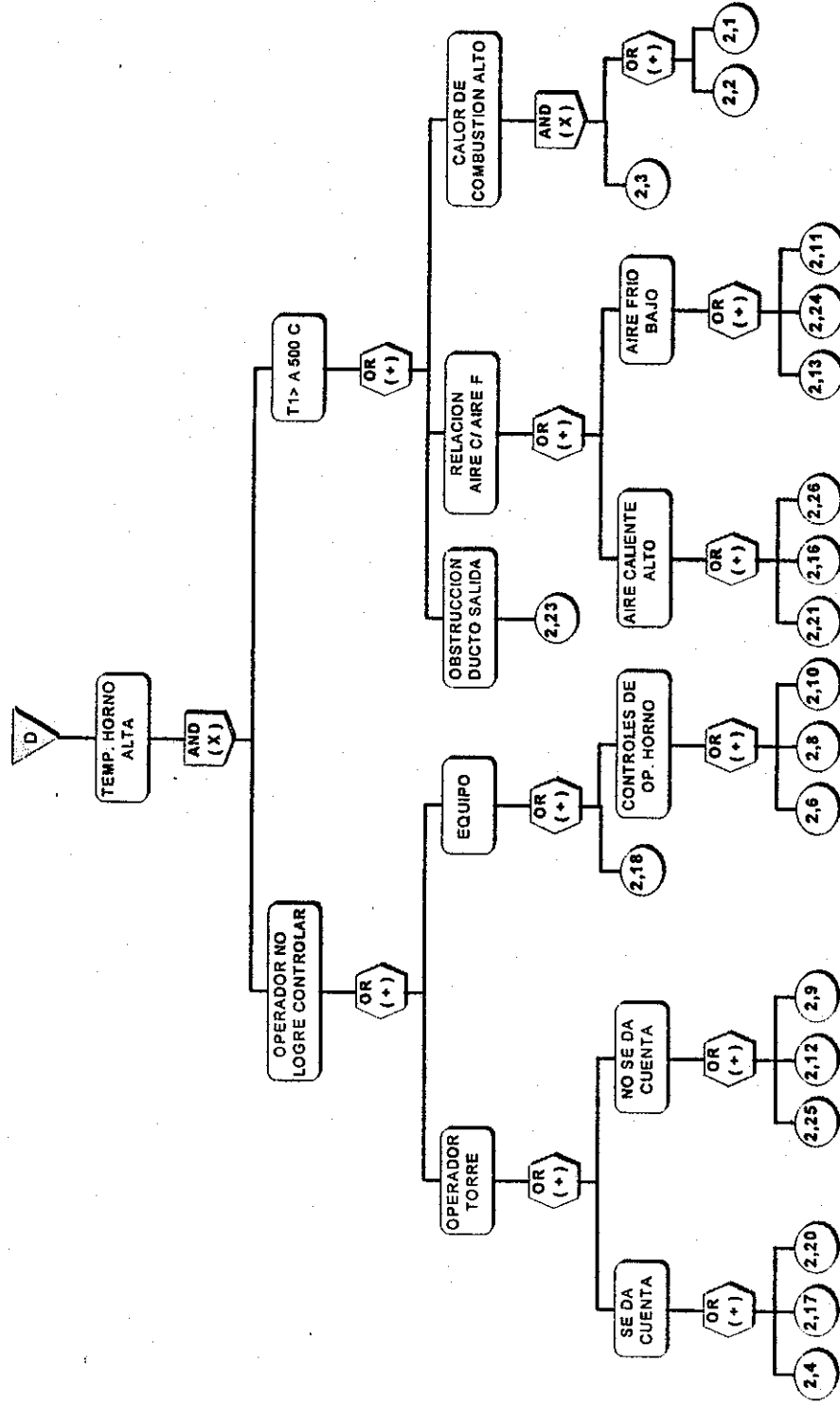
Apéndice A(Continuacion)

Figura No 12: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA ACTUAL (COLECTOR)



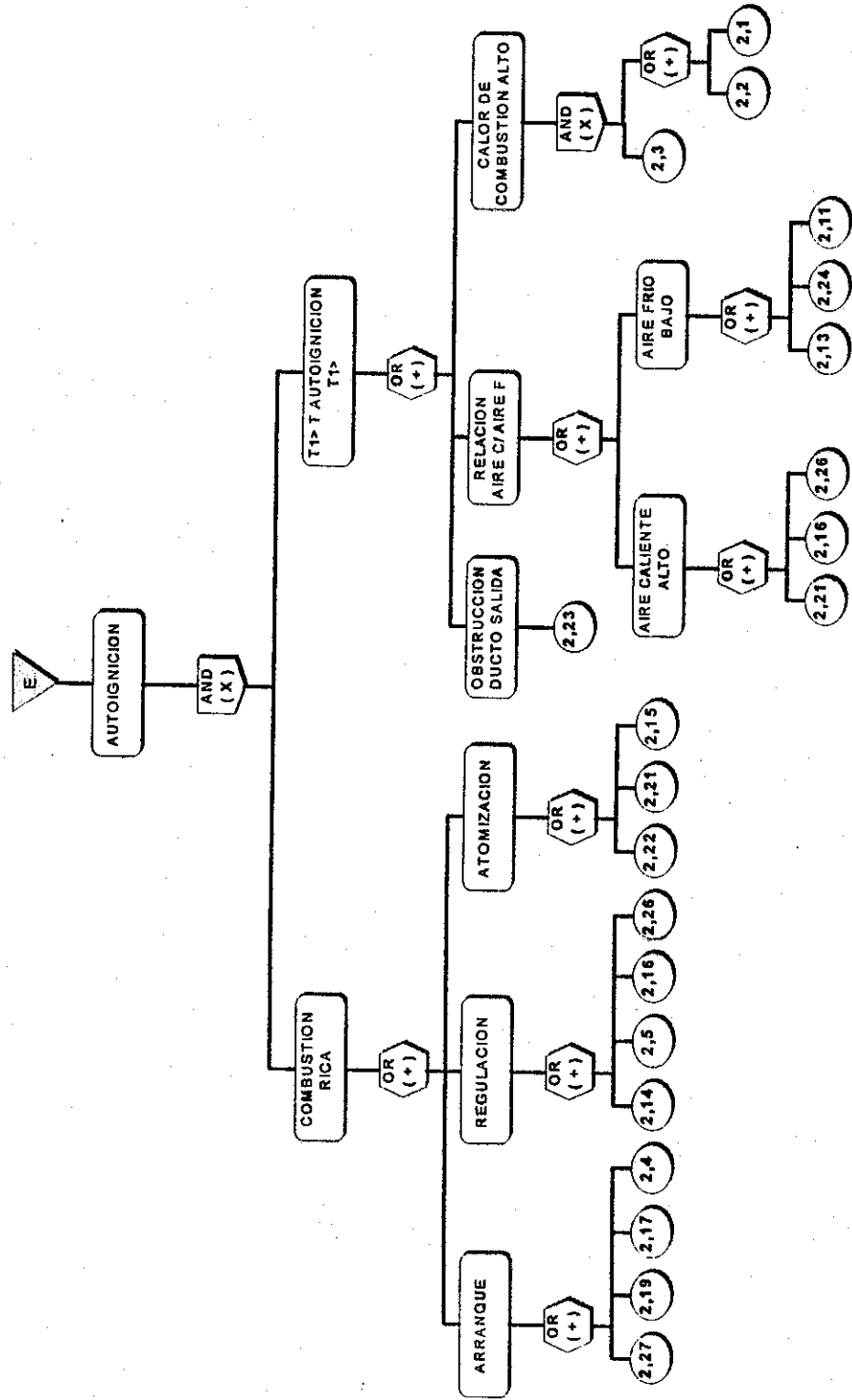


Apéndice A(Continuacion) Figura No 13: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA ACTUAL (TEMPERATURA HORNO ALTA)





Apéndice A(Continuacion) Figura No 14: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA ACTUAL (AUTOIGNICION)



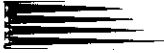


**Tabla No VIII: "CUT SETS" MINIMOS  
SISTEMA ACTUAL, TORRE**

CUT SET	PROBABILIDAD	CUT SET	PROBABILIDAD
P1,33	9.6970E-03	P1,6	1.6529E-03
P1,26	2.7548E-03	P1,13	1.1019E-03
P1,8	2.7548E-03	P1,35	2.7548E-04
P1,36	2.7548E-03	P1,5	2.2957E-04
P1,40	3.6731E-04	P1,2	1.8365E-04
P1,39	3.6731E-04	P1,17	1.8365E-04
P1,41	3.6731E-04	P1,9	1.3774E-04
P1,31	2.2957E-04	P1,23	1.1478E-04
P1,30	1.8365E-04	P1,1	9.1827E-05
P1,24	1.8365E-04	P1,4*P1,37	8.0140E-06
P1,21	1.8365E-04	P1,18*P1,37	8.0140E-06
P1,20	1.1478E-04	P1,16*P1,37	5.3427E-06
P1,14	1.1478E-04	P1,15*P1,37	5.3427E-06
P1,42	3.6731E-05	P1,4*P1,34	4.0070E-06
P1,29*P1,12	1.6028E-05	P1,18*P1,34	4.0070E-06
P1,22*P1,37	1.3357E-06	P1,16*P1,34	2.6713E-06
P1,29*P1,19	6.0712E-07	P1,15*P1,34	2.6713E-06
P1,29*P1,25	4.5534E-08	P1,4*P1,3	1.8214E-06
P1,29*P1,38*P1,7	2.6493E-08	P1,18*P1,3	1.8214E-06
P1,29*P1,38*P1,27	2.6493E-08	P1,16*P1,3	1.2142E-06
P1,10*P1,11	2.1081E-08	P1,15*P1,3	1.2142E-06
P1,29*P1,19*P1,7	1.0035E-09	P1,22*P1,34	6.6784E-07
P1,29*P1,19*P1,27	1.0035E-09	P1,22*P1,3	3.0356E-07

RIESGO EN TORRE	0.02415
RIESGO TOTAL	0.05723
CONFIABILIDAD TOTAL	0.94277





**Tabla No IX: "CUT SETS" MINIMOS  
SISTEMA ACTUAL, COLECTOR**

CUT SET	PROBABILIDAD	CUT SET	PROBABILIDAD
P1,33	9.6970E-03	P1,36	2.7548E-03
P1,26	2.7548E-03	P1,41	3.6731E-04
P1,8	2.7548E-03	B*P3,12	3.8982E-05
P3,7	4.5914E-04	P1,42	3.6731E-05
P1,40	3.6731E-04	P1,29*P1,12	1.6028E-05
P1,39	3.6731E-04	B*P3,4	1.1074E-05
P1,31	2.2957E-04	B*P3,14	1.8457E-06
P1,30	1.8365E-04	B*P3,8	7.3829E-07
P1,24	1.8365E-04	B*P3,13	7.3829E-07
P1,21	1.8365E-04	P1,29*P1,19	6.0712E-07
P1,20	1.1478E-04	B*P3,5	5.5372E-07
P1,14	1.1478E-04	B*P3,1	1.4766E-07
P3,9	1.1478E-04	P1,29*P1,25	4.5534E-08
P3,10	4.5914E-05	P1,29*P1,38*P1,7	2.6493E-08
P3,3*P3,12	1.7809E-06	P1,29*P1,38*P1,27	2.6493E-08
P3,3*P3,4	5.0594E-07	P1,10*P1,11	2.1081E-08
P3,3*P3,14	8.4323E-08	P1,29*P1,19*P1,7	1.0035E-09
P3,3*P3,8	3.3729E-08	P1,29*P1,19*P1,27	1.0035E-09
P3,3*P3,13	3.3729E-08	P3,3*P3,12*P3,11	1.2265E-10
P3,3*P3,5	2.5297E-08	B*P3,11*P3,6	3.8135E-11
P3,3*P3,1	6.7458E-09	P3,11*P3,6*P3,3	1.7422E-12
B*P3,2*P3,11	1.0169E-11		

RIESGO EN COLECTOR	0.02080
RIESGO TOTAL	0.05723
CONFIABILIDAD TOTAL	0.94277



**Tabla No X: "CUT SETS" MINIMOS  
SISTEMA ACTUAL, HORNO**

CUT SET	PROBABILIDAD	CUT SET	PROBABILIDAD	CUT SET	PROBABILIDAD
P2,16	2.20386E-03	P2,21	3.67309E-04	P2,26	9.69697E-03
P2,17*P2,11	3.37291E-08	P2,25*P2,11	1.78089E-06	P2,4*P2,11	5.05936E-07
P2,17*P2,11	3.37291E-08	P2,25*P2,13	1.11306E-06	P2,7*P2,11	4.04749E-07
P2,10*P2,11	2.52968E-08	P2,19*P2,11	5.05936E-07	P2,4*P2,13	3.1621E-07
P2,12*P2,11	2.10807E-08	P2,25*P2,23	4.45224E-07	P2,7*P2,13	2.52968E-07
P2,17*P2,13	2.10807E-08	P2,25*P2,24	4.45224E-07	P2,4*P2,23	1.26484E-07
P2,17*P2,13	2.10807E-08	P2,19*P2,13	3.1621E-07	P2,4*P2,24	1.26484E-07
P2,15*P2,11	1.68645E-08	P2,19*P2,23	1.26484E-07	P2,7*P2,23	1.01187E-07
P2,10*P2,13	1.58105E-08	P2,19*P2,24	1.26484E-07	P2,7*P2,24	1.01187E-07
P2,12*P2,13	1.31754E-08	P2,20*P2,11	4.21613E-08	P2,5*P2,11	5.05936E-08
P2,14*P2,11	1.26484E-08	P2,22*P2,11	3.37291E-08	P2,6*P2,11	5.05936E-08
P2,15*P2,13	1.05403E-08	P2,20*P2,13	2.63506E-08	P2,5*P2,13	3.1621E-08
P2,17*P2,23	8.43226E-09	P2,22*P2,13	2.10807E-08	P2,6*P2,13	3.1621E-08
P2,17*P2,23	8.43226E-09	P2,20*P2,23	1.05403E-08	P2,9*P2,11	2.10807E-08
P2,17*P2,24	8.43226E-09	P2,20*P2,24	1.05403E-08	P2,9*P2,13	1.31754E-08
P2,17*P2,24	8.43226E-09	P2,22*P2,23	8.43226E-09	P2,5*P2,23	1.26484E-08
P2,14*P2,13	7.90525E-09	P2,22*P2,24	8.43226E-09	P2,6*P2,24	1.26484E-08
P2,10*P2,23	6.3242E-09	P2,18*P2,11	1.68645E-09	P2,6*P2,23	1.26484E-08
P2,10*P2,24	6.3242E-09	P2,18*P2,13	1.05403E-09	P2,6*P2,24	1.26484E-08
P2,12*P2,23	5.27017E-09	P2,18*P2,23	4.21613E-10	P2,9*P2,23	5.27017E-09
P2,12*P2,24	5.27017E-09	P2,18*P2,24	4.21613E-10	P2,9*P2,24	5.27017E-09
P2,15*P2,23	4.21613E-09	P2,25*P2,3*P2,6	2.45302E-11	P2,8*P2,11	5.05936E-09
P2,15*P2,24	4.21613E-09	P2,19*P2,3*P2,6	6.96881E-12	P2,8*P2,13	3.1621E-09
P2,14*P2,23	3.1621E-09	P2,25*P2,3*P2,1	1.63535E-12	P2,8*P2,23	1.26484E-09
P2,14*P2,24	3.1621E-09	P2,20*P2,3*P2,6	5.80734E-13	P2,8*P2,24	1.26484E-09
P2,10*P2,3*P2,6	3.48441E-13	P2,17*P2,3*P2,6	4.64588E-13	P2,4*P2,3*P2,6	6.96881E-12
P2,12*P2,3*P2,6	2.90367E-13	P2,17*P2,3*P2,6	4.64588E-13	P2,7*P2,3*P2,6	5.57505E-12
P2,15*P2,3*P2,6	2.32294E-13	P2,22*P2,3*P2,6	4.64588E-13	P2,5*P2,3*P2,6	6.96881E-13
P2,14*P2,3*P2,6	1.7422E-13	P2,19*P2,3*P2,1	4.64588E-13	P2,4*P2,3*P2,1	4.64588E-13
P2,17*P2,3*P2,1	3.09725E-14	P2,9*P2,3*P2,6	2.90367E-13	P2,7*P2,3*P2,1	3.7167E-13
P2,10*P2,3*P2,1	2.32294E-14	P2,20*P2,3*P2,1	3.87156E-14	P2,8*P2,3*P2,6	6.96881E-14
P2,12*P2,3*P2,1	1.93578E-14	P2,17*P2,3*P2,1	3.09725E-14	P2,5*P2,3*P2,1	4.64588E-14
P2,9*P2,3*P2,1	1.93578E-14	P2,22*P2,3*P2,1	3.09725E-14	P2,6*P2,3*P2,1	4.64588E-14
P2,15*P2,3*P2,1	1.54863E-14	P2,18*P2,3*P2,6	2.32294E-14	P2,8*P2,3*P2,1	4.64588E-15
P2,14*P2,3*P2,1	1.16147E-14	P2,18*P2,3*P2,1	1.54863E-15		

RIESGO EN HORNO 0.01228  
 RIESGO TOTAL 0.05723  
 CONFIABILIDAD TOTAL 0.94277

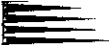
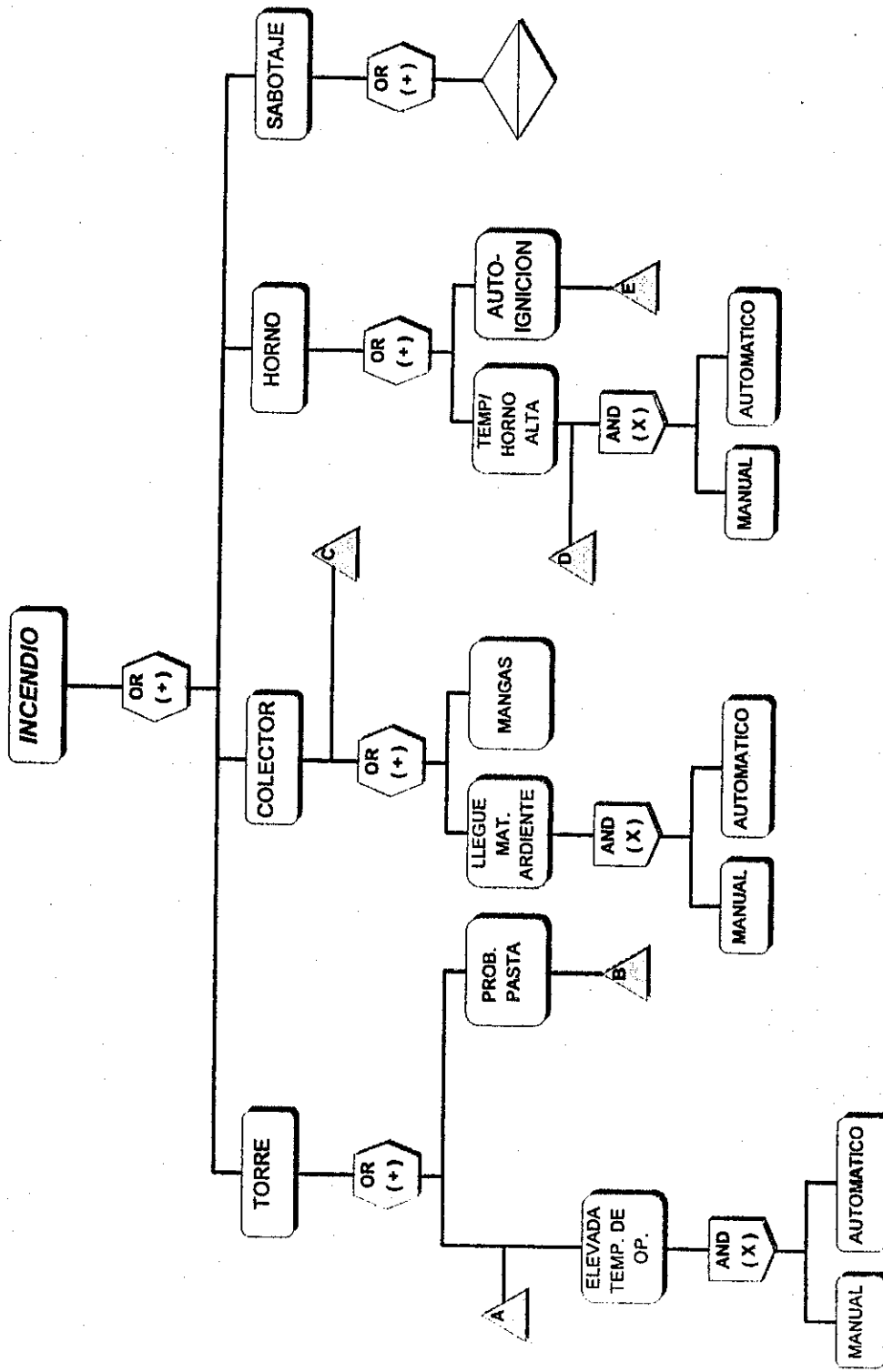
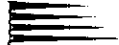


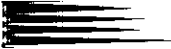
Figura No 15: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA PROPUESTO (INCENDIO)



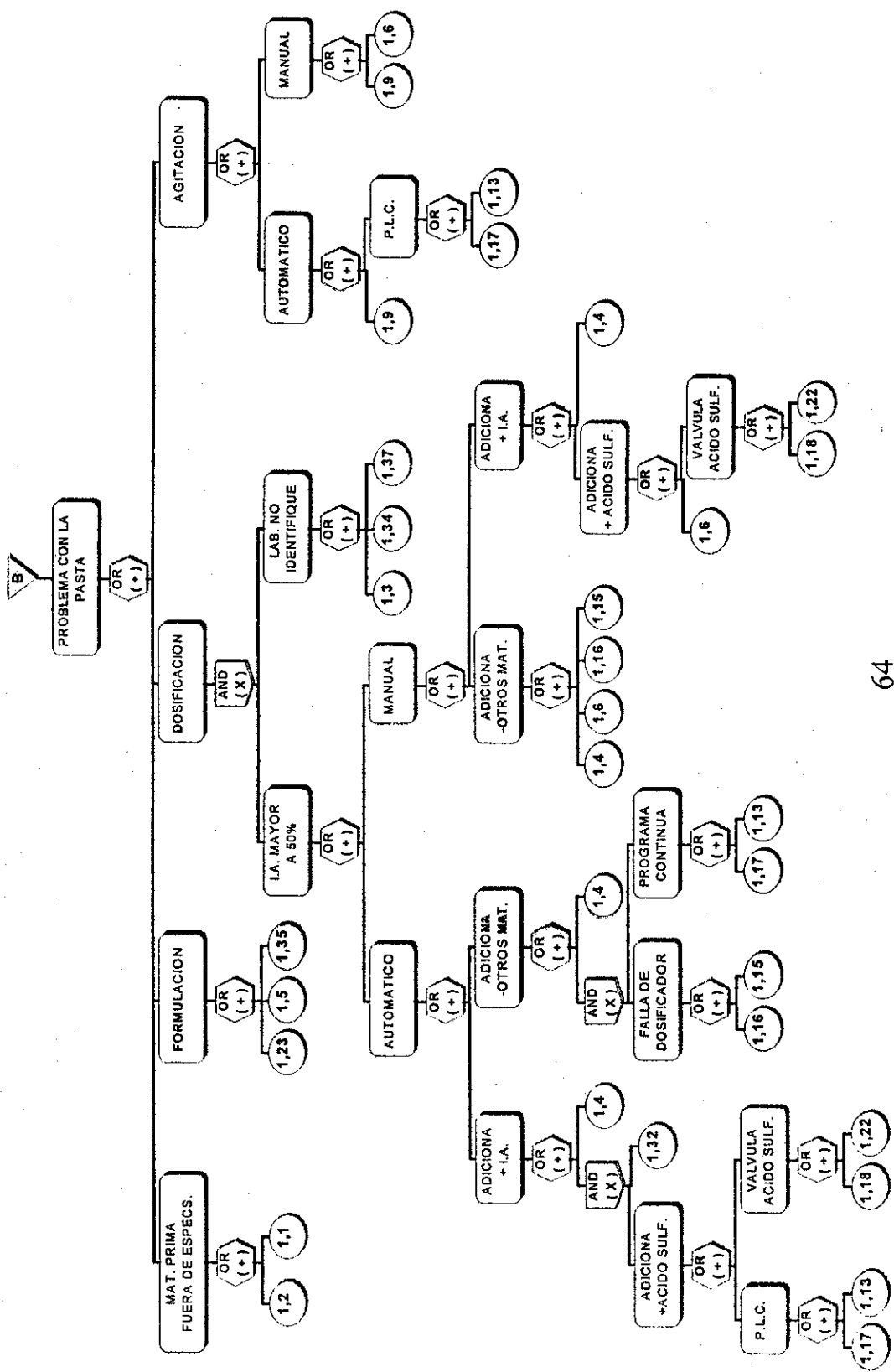








Apéndice C (Continuación) Figura No 17: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA PROPUESTO (PROBLEMA CON LA PASTA)





5



2

Apéndice C (Continuación) Figura No 18: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA PROPUESTO (COLECTOR)

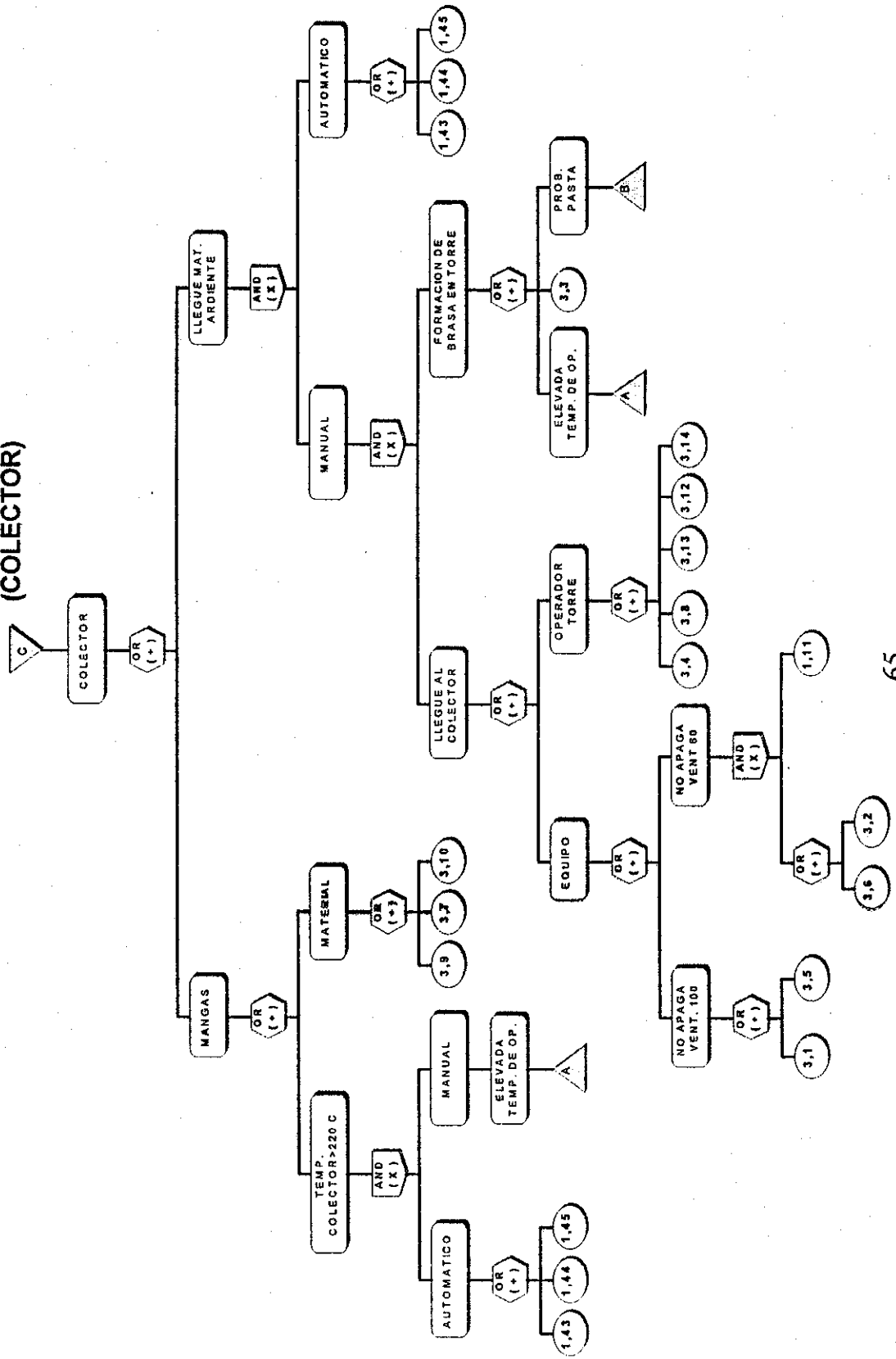




Figura No 19: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA PROPUESTO (TEMPERATURA DE HORNO ALTA)

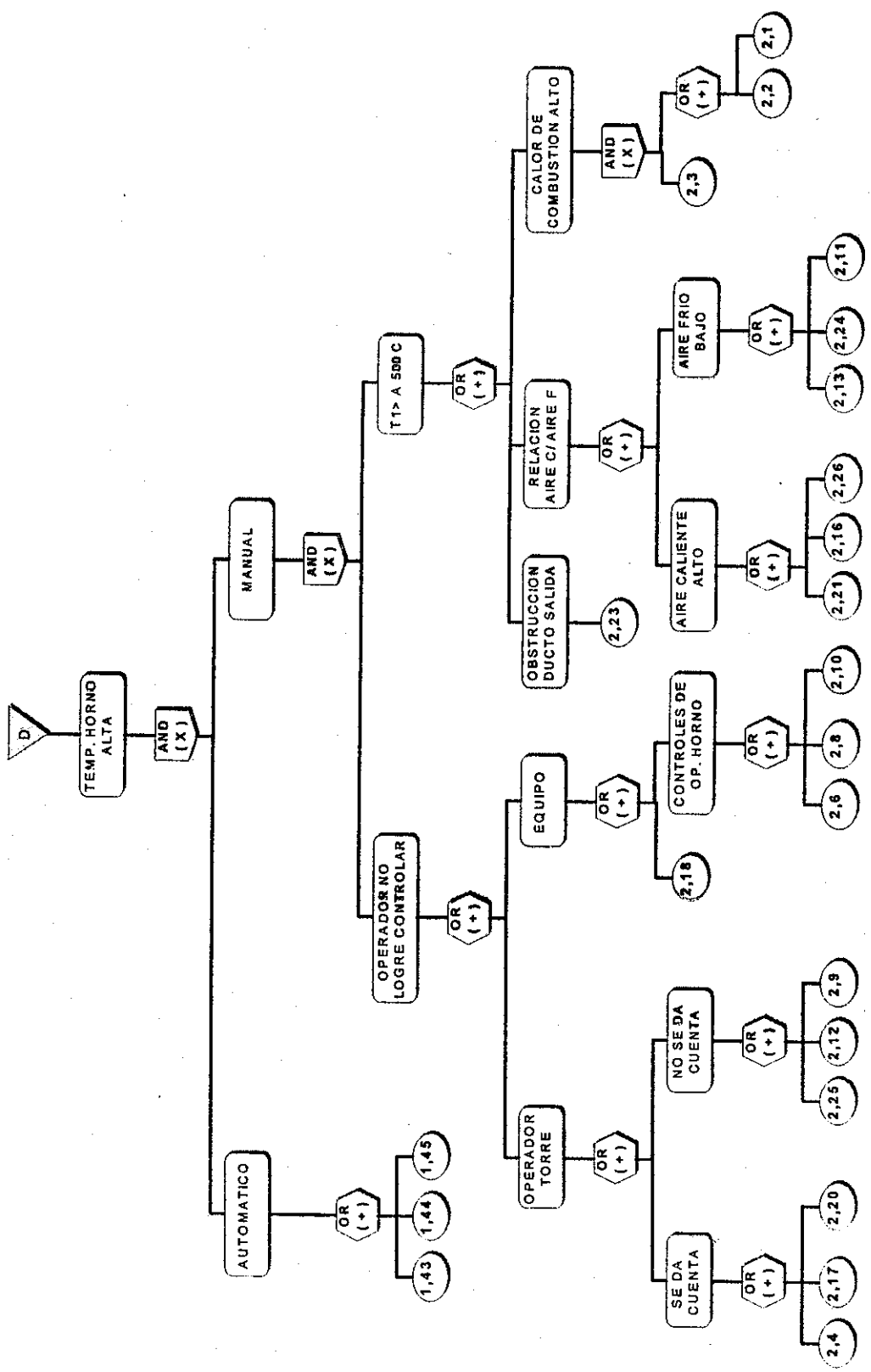
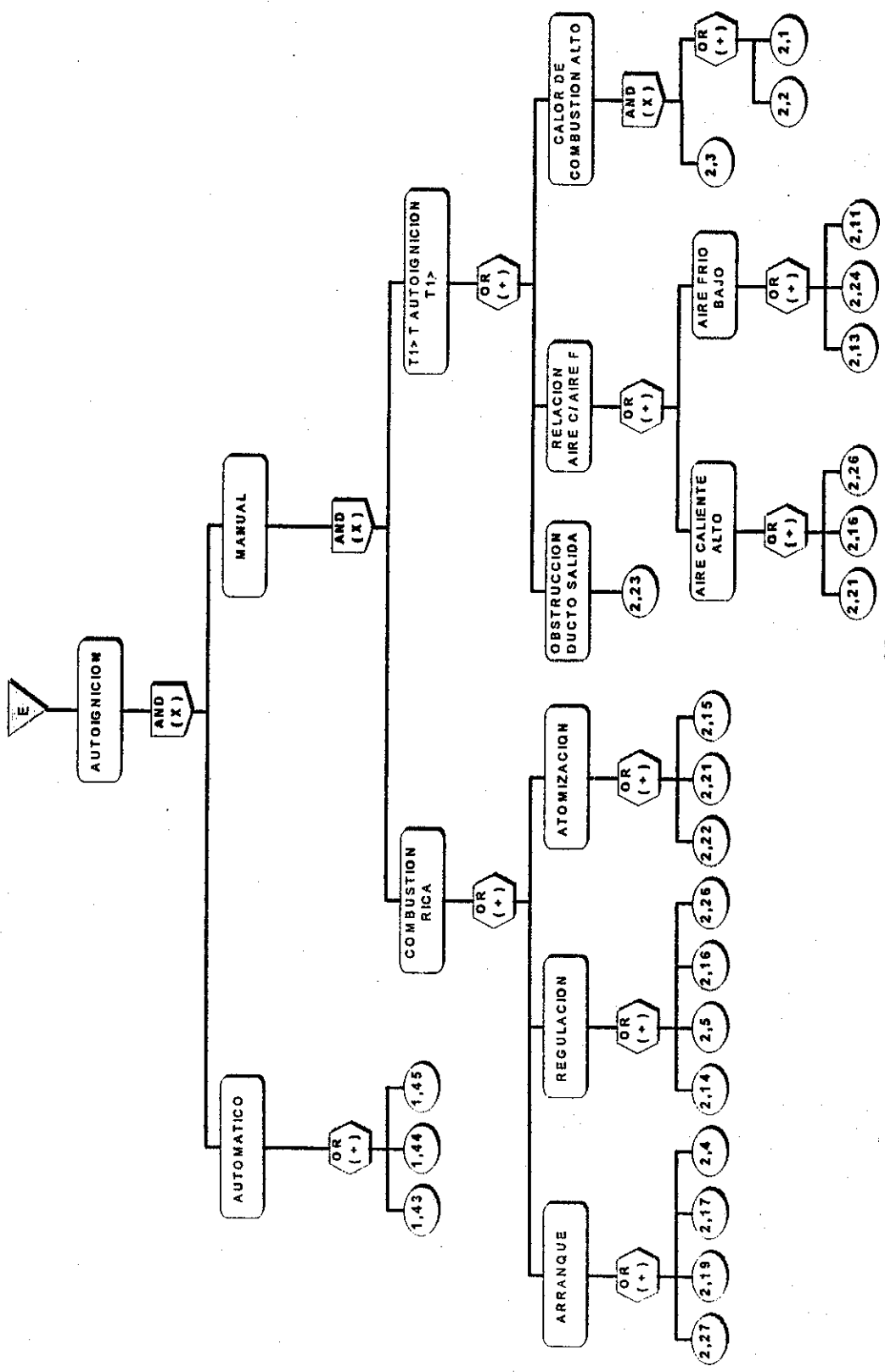




Figura No 20: ÁRBOL DE FALLA SISTEMA PROPUESTO (AUTOIGNICION)







**Tabla No XI: "CUT SETS" MINIMOS  
SISTEMA PROPUESTO, TORRE**

CUT SET	PROBABILIDAD	CUT SET	PROBABILIDAD
P1,22*P1,37	1.3357E-06	P1,6	1.6529E-03
(PI,43+PI44+PI45)*P1,33	7.5688E-07	P1,13	1.1019E-03
(PI,43+PI44+PI45)*P1,26	2.1502E-07	P1,35	2.7548E-04
(PI,43+PI44+PI45)*P1,8	2.1502E-07	P1,5	2.2957E-04
(PI43+PI44+PI45)*P1,36	2.1502E-07	P1,2	1.8365E-04
(PI,43+PI44+PI45)*P1,39	2.8670E-08	P1,9	1.3774E-04
(PI,43+PI44+PI45)*P1,40	2.8670E-08	P1,23	1.1478E-04
(PI43+PI44+PI45)*P1,41	2.8670E-08	P1,1	9.1827E-05
(PI,43+PI44+PI45)*P1,31	1.7919E-08	P1,17	9.1827E-05
(PI,43+PI44+PI45)*P1,24	1.4335E-08	P1,18*P1,37	8.0140E-06
(PI,43+PI44+PI45)*P1,30	1.4335E-08	P1,4*P1,37	8.0140E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,21	1.4335E-08	P1,15*P1,37	5.3427E-06
(PI,43+PI44+PI45)*P1,14	8.9593E-09	P1,16*P1,37	5.3427E-06
(PI,43+PI44+PI45)*P1,20	8.9593E-09	P1,18*P1,34	4.0070E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,42	2.8670E-09	P1,4*P1,34	4.0070E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,12	1.2510E-09	P1,15*P1,34	2.6713E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,19	4.7388E-11	P1,16*P1,34	2.6713E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,25	3.5541E-12	P1,18*P1,3	1.8214E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,38*P1,27	2.0678E-12	P1,4*P1,3	1.8214E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,38*P1,7	2.0678E-12	P1,15*P1,3	1.2142E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,10*P1,11	1.6454E-12	P1,16*P1,3	1.2142E-06
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,19*P1,27	7.8327E-14	P1,22*P1,34	6.6784E-07
(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,19*P1,7	7.8327E-14	P1,22*P1,3	3.0356E-07

RIESGO EN TORRE  
RIESGO TOTAL  
CONFIABILIDAD TOTAL

0.00393  
0.00455  
0.99545

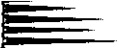


**Tabla No XII: "CUT SETS" MINIMOS  
SISTEMA PROPUESTO, COLECTOR**

CUT SET	PROBABILIDAD	CUT SET	PROBABILIDAD
P3,7	4.5914E-04	(PI43+PI44+PI45)*P1,36	2.1502E-07
P3,9	1.1478E-04	(PI43+PI44+PI45)*P1,41	2.8670E-08
P3,10	4.5914E-05	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,12	2.9731E-09
(PI,43+PI44+PI45)*P1,33	7.5688E-07	(PI43+PI44+PI45)*P1,42	2.8670E-09
(PI,43+PI44+PI45)*P1,26	2.1502E-07	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,12	1.2510E-09
(PI,43+PI44+PI45)*P1,8	2.1502E-07	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,4	8.4464E-10
(PI,43+PI44+PI45)*P1,39	2.8670E-08	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,14	1.4077E-10
(PI,43+PI44+PI45)*P1,40	2.8670E-08	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,13	5.6310E-11
(PI,43+PI44+PI45)*P1,31	1.7919E-08	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,8	5.6310E-11
(PI,43+PI44+PI45)*P1,24	1.4335E-08	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,19	4.7388E-11
(PI,43+PI44+PI45)*P1,30	1.4335E-08	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,5	4.2232E-11
(PI43+PI44+PI45)*P1,21	1.4335E-08	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,1	1.1262E-11
(PI,43+PI44+PI45)*P1,14	8.9593E-09	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,25	3.5541E-12
(PI,43+PI44+PI45)*P1,20	8.9593E-09	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,38*P1,27	2.0678E-12
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,12	1.3900E-10	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,38*P1,7	2.0878E-12
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,4	3.9490E-11	(PI43+PI44+PI45)*P1,10*P1,11	1.6454E-12
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,14	6.5817E-12	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,19*P1,27	7.8327E-14
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,13	2.6327E-12	(PI43+PI44+PI45)*P1,29*P1,19*P1,7	7.8327E-14
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,8	2.6327E-12	(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,12*P3,11	9.5733E-15
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,5	1.9745E-12	(PI43+PI44+PI45)*B*P3,11*P3,6	2.9085E-15
(PI43+PI44+PI45)*P3,3*P3,1	5.2653E-13	(PI43+PI44+PI45)*P3,11*P3,6*P3,3	1.3598E-16
(PI43+PI44+PI45)*B*P3,2*P3,11	5.8171E-16		

RIESGO EN COLECTOR  
RIESGO TOTAL  
CONFIABILIDAD TOTAL

0.00062  
0.00455  
0.99545



**Tabla No XIII: "CUT SETS" MINIMOS  
SISTEMA PROPUESTO, HORNO**

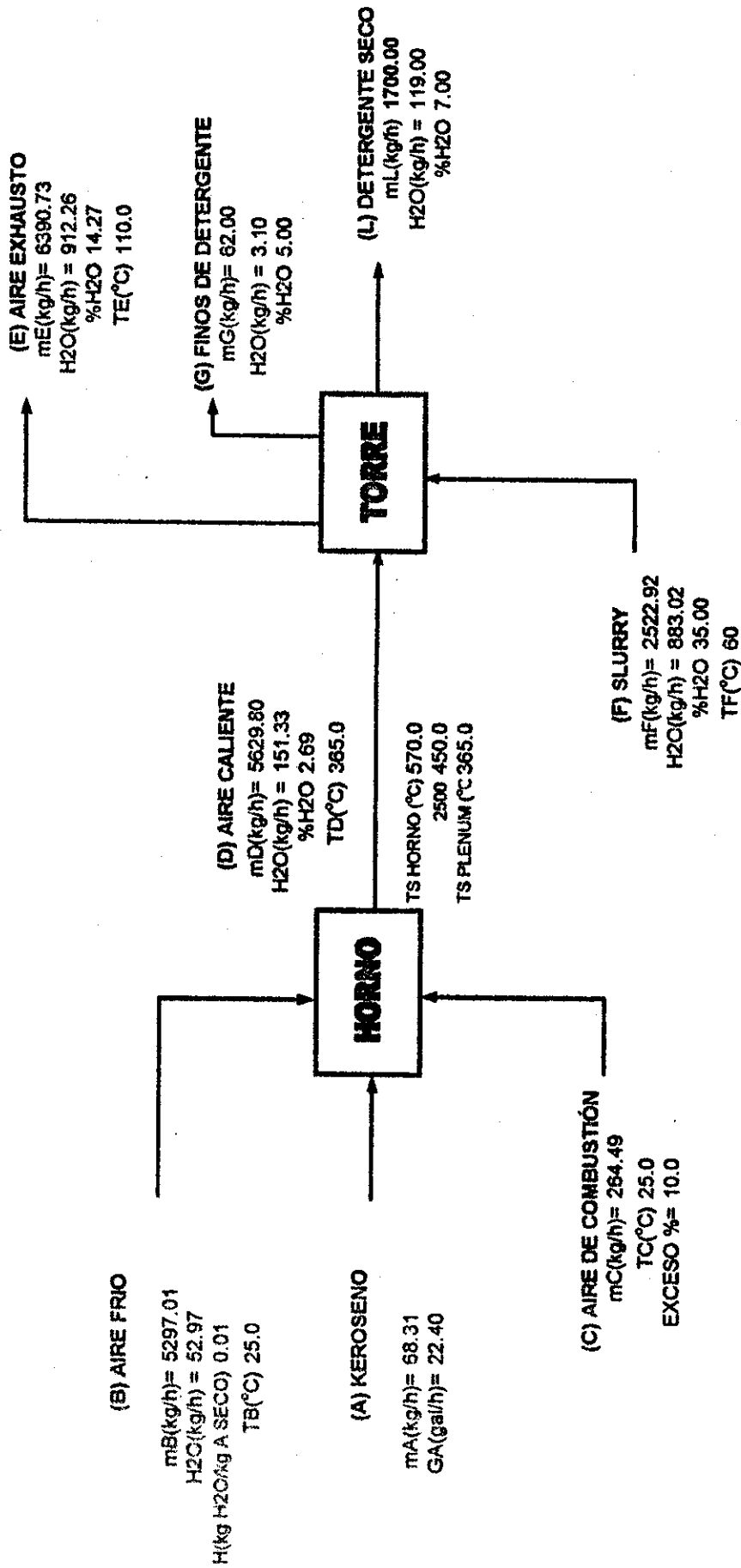
CUT SET	PROB.	CUT SET	PROB.	CUT SET	PROB.
(PI43+PI44+PI45)*P2,16	1.72E-07	(PI43+PI44+PI45)*P2,21	2.87E-08	(PI43+PI44+PI45)*P2,26	7.57E-07
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,11	2.63E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,25*P2,11	1.39E-10	(PI43+PI44+PI45)*P2,4*P2,11	3.95E-11
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,11	2.63E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,25*P2,13	8.69E-11	(PI43+PI44+PI45)*P2,7*P2,11	3.16E-11
(PI43+PI44+PI45)*P2,10*P2,11	1.97E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,19*P2,11	3.95E-11	(PI43+PI44+PI45)*P2,4*P2,13	2.47E-11
(PI43+PI44+PI45)*P2,12*P2,11	1.65E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,25*P2,23	3.48E-11	(PI43+PI44+PI45)*P2,7*P2,13	1.97E-11
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,13	1.65E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,25*P2,24	3.48E-11	(PI43+PI44+PI45)*P2,4*P2,23	9.87E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,13	1.65E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,19*P2,13	2.47E-11	(PI43+PI44+PI45)*P2,4*P2,24	9.87E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,15*P2,11	1.32E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,19*P2,23	9.87E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,7*P2,23	7.90E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,10*P2,13	1.23E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,19*P2,24	9.87E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,7*P2,24	7.90E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,12*P2,13	1.03E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,22*P2,11	2.63E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,5*P2,11	3.95E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,14*P2,11	9.87E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,22*P2,13	1.65E-12	(PI43+PI44+PI45)*P2,6*P2,11	3.95E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,15*P2,13	8.23E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,22*P2,23	6.58E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,5*P2,13	2.47E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,23	6.58E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,22*P2,24	6.58E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,6*P2,13	2.47E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,23	6.58E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,18*P2,11	1.32E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,9*P2,11	1.65E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,24	6.58E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,18*P2,13	8.23E-14	(PI43+PI44+PI45)*P2,9*P2,13	1.03E-12
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,24	6.58E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,18*P2,23	3.29E-14	(PI43+PI44+PI45)*P2,5*P2,23	9.87E-13
(PI43+PI44+PI45)*P2,14*P2,13	6.17E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,18*P2,24	3.29E-14	(PI43+PI44+PI45)*P2,5*P2,24	9.87E-13
(PI43+PI44+PI45)*P2,10*P2,23	4.94E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,25*P2,3*P2	1.91E-15	(PI43+PI44+PI45)*P2,6*P2,23	9.87E-13
(PI43+PI44+PI45)*P2,10*P2,24	4.94E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,19*P2,3*P2	5.44E-16	(PI43+PI44+PI45)*P2,6*P2,24	9.87E-13
(PI43+PI44+PI45)*P2,12*P2,23	4.11E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,20*P2,11	2.57E-16	(PI43+PI44+PI45)*P2,9*P2,23	4.11E-13
(PI43+PI44+PI45)*P2,12*P2,24	4.11E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,20*P2,13	1.61E-16	(PI43+PI44+PI45)*P2,9*P2,24	4.11E-13
(PI43+PI44+PI45)*P2,15*P2,23	3.29E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,25*P2,3*P2	1.28E-16	(PI43+PI44+PI45)*P2,4*P2,3*P2	5.44E-16
(PI43+PI44+PI45)*P2,15*P2,24	3.29E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,20*P2,23	6.42E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,7*P2,3*P2	4.35E-16
(PI43+PI44+PI45)*P2,14*P2,23	2.47E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,20*P2,24	6.42E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,5*P2,3*P2	5.44E-17
(PI43+PI44+PI45)*P2,14*P2,24	2.47E-13	(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,3*P2	3.63E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,4*P2,3*P2	3.63E-17
(PI43+PI44+PI45)*P2,10*P2,3*P2	2.72E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,3*P2	3.63E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,8*P2,11	3.08E-17
(PI43+PI44+PI45)*P2,12*P2,3*P2	2.27E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,19*P2,3*P2	3.63E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,7*P2,3*P2	2.90E-17
(PI43+PI44+PI45)*P2,15*P2,3*P2	1.81E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,22*P2,3*P2	3.63E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,8*P2,13	1.93E-17
(PI43+PI44+PI45)*P2,14*P2,3*P2	1.36E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,9*P2,3*P2	2.27E-17	(PI43+PI44+PI45)*P2,8*P2,23	7.71E-18
(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,3*P2	2.42E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,17*P2,3*P2	2.42E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,8*P2,24	7.71E-18
(PI43+PI44+PI45)*P2,10*P2,3*P2	1.81E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,22*P2,3*P2	2.42E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,8*P2,3*P2	5.44E-18
(PI43+PI44+PI45)*P2,12*P2,3*P2	1.51E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,18*P2,3*P2	1.81E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,5*P2,3*P2	3.63E-18
(PI43+PI44+PI45)*P2,9*P2,3*P2	1.51E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,18*P2,3*P2	1.21E-19	(PI43+PI44+PI45)*P2,6*P2,3*P2	3.63E-18
(PI43+PI44+PI45)*P2,15*P2,3*P2	1.21E-18	(PI43+PI44+PI45)*P2,20*P2,3*P2	3.54E-21	(PI43+PI44+PI45)*P2,8*P2,3*P2	2.83E-23
(PI43+PI44+PI45)*P2,14*P2,3*P2	9.07E-19	(PI43+PI44+PI45)*P2,20*P2,3*P2	2.36E-22		

RIESGO EN HORNO  
RIESGO TOTAL  
CONFIABILIDAD TOTAL

9.58E-07  
0.00455  
0.99545



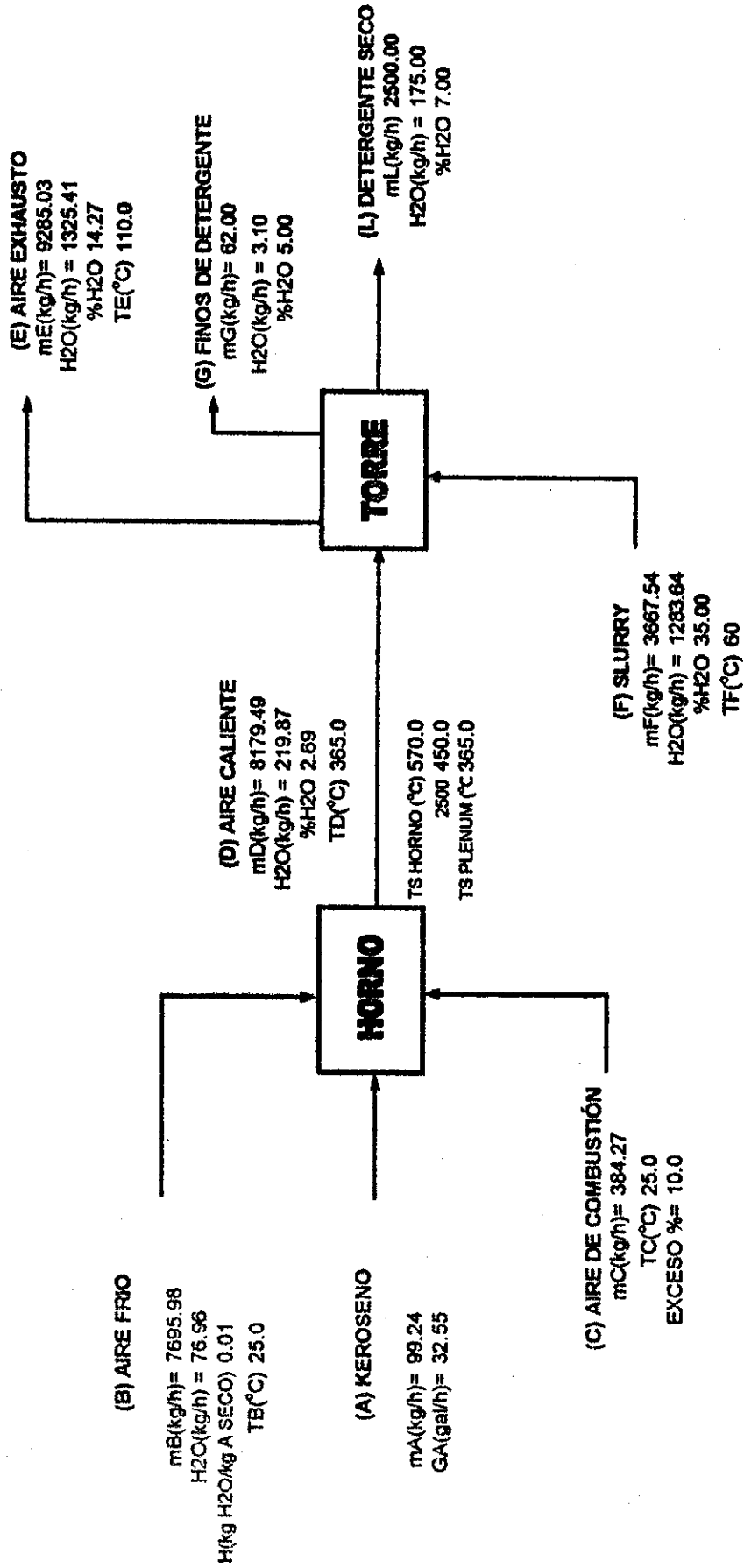
**Figura No 21: BALANCE DEL PROCESO DE SECADO DE DETERGENTES  
CON 2 TORERAS**





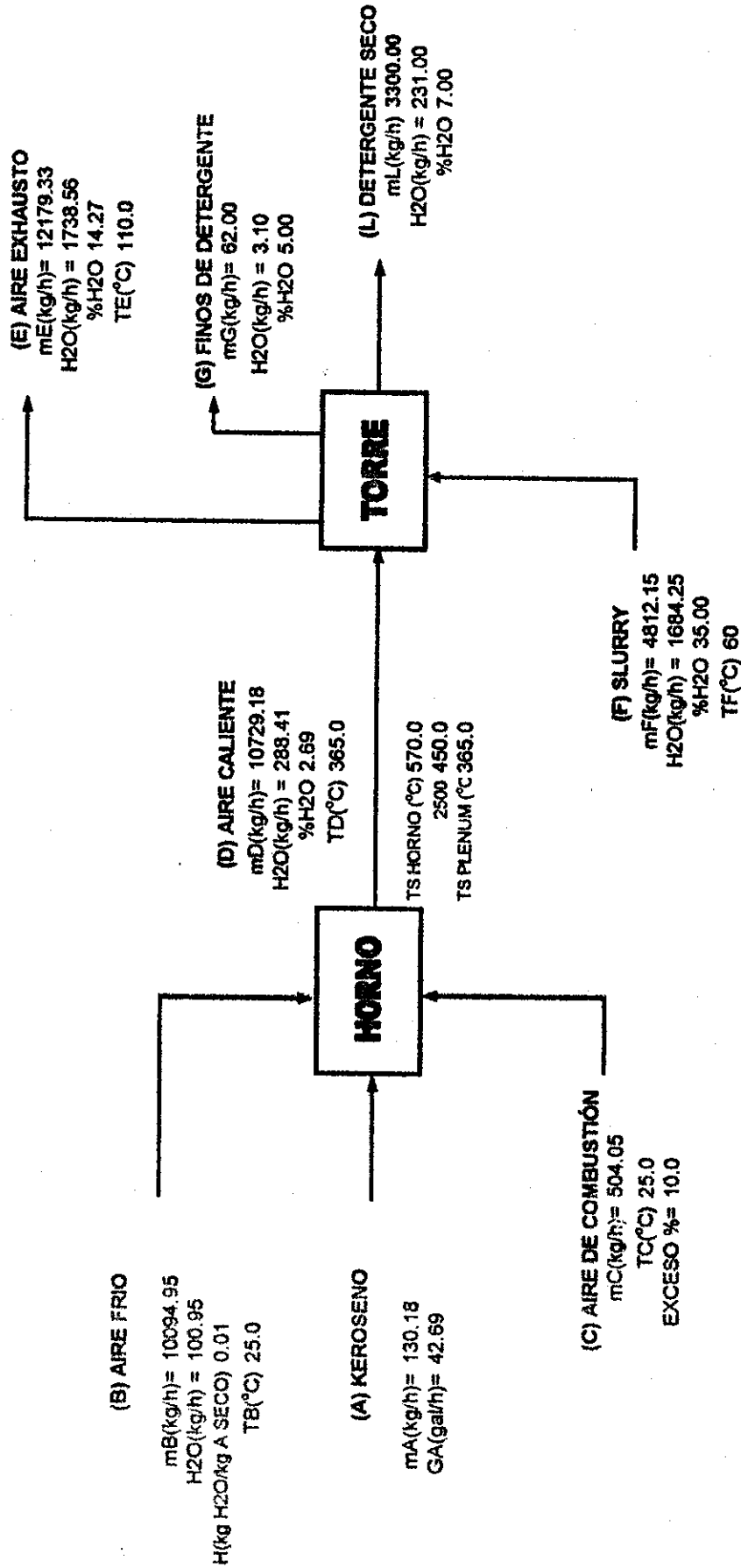


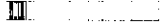
**Figura No 22: BALANCE DEL PROCESO DE SECADO DE DETERGENTES  
CON 3 TOBERAS**





**Figura No 23: BALANCE DEL PROCESO DE SECADO DE DETERGENTES CON 4 TOBERAS**





Apéndice E 2

Tabla No XIV:HOJA DE CÁLCULO DE FLUJO DE COMBUSTIBLE  
Con 2 Toberas

HORNO	
ENTRADAS	
KEROSENO (A)	mA(kg/h)= 68.307 GA(gal/h)= 22.401 gal/100 kg DET. SECO 1.3177
AIRE FRIO (B)	mB(kg/h)= 5297.011 H2O(kg/h)= 52.970 H(kg H2O/kg A SEC 0.010 TB(°C) 25.000
AIRE COMBUSTION (C)	mC(kg/h)= 264.485 TC(°C) 25.000 EXCESO %= 10.000
SALIDAS	
AIRE CALIENTE (D)	mD(kg/h)= 5629.803 H2O(kg/h)= 151.332 %H2O 2.688 TD(°C) 365.000

TORRE	
ENTRADAS	
AIRE CALIENTE (D)	mD(kg/h)= 5629.803 H2O(kg/h)= 151.332 %H2O 2.688 TD(°C) 365.000
SLURRY (F)	mF(kg/h)= 2522.923 H2O(kg/h)= 883.023 %H2O 35.000 TF(°C) 60.000
SALIDAS	
AIRE EXHAUSTO (E)	mE(kg/h)= 6390.726 H2O(kg/h)= 912.255 %H2O 14.275 TE(°C) 110.000
FINOS DE DETERGENTE (G)	mG(kg/h)= 62.000 H2O(kg/h)= 3.100 %H2O 5.000
DETERGENTE SECO (L)	mL(kg/h)= 1700.000 H2O(kg/h)= 119.000 %H2O 7.000

OTROS DATOS IMPORTANTES	
AGUA A EVAPORAR	kg/h 760.923
Q. NEC. PARA EVAP	J/h 1.44309E+09
PERDIDAS EN TORRE	J/h 7.21544E+07
PERDIDAS EN TORRE	% 5.000
PERDIDAS EN PLENUM	J/h 5.05081E+08
% PERDIDA EN PLENUM	% 35.000
PERDIDAS EN HORNO	J/h 7.13055E+08
% PERDIDA EN HORNO	% 49.412
eficiencia térmica	% 52.795
OTROS DATOS IMPORTANTES	
CP PROM AGUA	J/kg-K 4202.920
CP AIRE	J/kg-K 1023.673
ΔH VAPORIZACIÓN AGUA	J/kg 1686350.000
ΔH COMBUSTIÓN KEROSENO	J/kg 43263600.000
TS HORNO (°C)	°C 570.000
TE PLENUM(°C)	°C 450.000
TS PLENUM (°C)	°C 365.000



Tabla No XV: HOJA DE CALCULO DE FLUJO DE COMBUSTIBLE  
Con 3 Toberas

HORNO	
ENTRADAS	
KEROSENO (A)	m <sup>3</sup> (kg/h)= 99.243 G/kgal(h)= 32.547 gal/100 kg DET. SECO 1.3019
AIRE FRIO (B)	m <sup>3</sup> (kg/h)= 7695.980 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 76.960 H(kg H <sub>2</sub> O/kg A SEC 0.010 TB(°C) 25.000
AIRE COMBUSTION (C)	mC(kg/h)= 364.268 TD(°C) 25.000 EXCESO %= 10.000
SALIDAS	
AIRE CALIENTE (D)	mD(kg/h)= 8179.491 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 219.869 %H <sub>2</sub> O 2.688 TD(°C) 365.000

TORRE	
ENTRADAS	
AIRE CALIENTE (D)	mD(kg/h)= 8179.491 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 219.869 %H <sub>2</sub> O 2.688 TD(°C) 365.000
SLURRY (F)	mF(kg/h)= 3667.538 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 1283.638 %H <sub>2</sub> O 35.000 TF(°C) 60.000
SALIDAS	
AIRE EXHAUSTO (E)	mE(kg/h)= 9285.030 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 1325.408 %H <sub>2</sub> O 14.275 TE(°C) 110.000
FINOS DE DETERGENTE (G)	mG(kg/h)= 62.000 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 3.100 %H <sub>2</sub> O 5.000
DETERGENTE SECO (L)	mL(kg/h) 2500.000 H <sub>2</sub> O(kg/h) = 175.000 %H <sub>2</sub> O 7.000

OTROS DATOS IMPORTANTES	
AGUA A EVAPORAR	kg/h 1105.538
Q. NEC. PARA EVAP	J/h 2.09665E+09
PÉRDIDAS EN TORRE	J/h 1.04832E+08
PÉRDIDAS EN TORRE	% 5.000
PÉRDIDAS EN PLENUM	J/h 7.33827E+08
% PÉRDIDA EN PLENUM	% 35.000
PÉRDIDAS EN HORNO	J/h 1.03599E+09
% PÉRDIDA EN HORNO	% 49.412
eficiencia térmica	% 52.795
CP PROM AGUA	J/kg-°K 4202.920
CP AIRE	J/kg-°K 1023.673
ΔH VAPORIZACIÓN AGUA	J/kg 1686350.000
ΔH COMBUSTIÓN KEROSENO	J/kg 43263600.000
TS HORNO (°C)	°C 570.000
TE PLENUM(°C)	°C 450.000
TS PLENUM (°C)	°C 365.000





Tabla No XVI: HOJA DE CÁLCULO DE FLUJO DE COMBUSTIBLE

Con 4 Toberas

HORNO	
ENTRADAS	SALIDAS
KEROSENO (A)	AIRE CALIENTE (D)
m <sup>3</sup> (kg/h)= 130.178	mD(kg/h)= 10729.180
GAl(gal/h)= 42.692	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 288.406
gal/100 kg DET. SECO 1.2937	%H <sub>2</sub> O 2.688
AIRE FRIO (B)	TD(°C) 365.000
mB(kg/h)= 10094.950	
H <sub>2</sub> O(kg/h) = 100.950	
H(kg H <sub>2</sub> O/kg A SEC 0.010	
TB(°C) 25.000	
AIRE COMBUSTION (C)	
mC(kg/h)= 504.051	
TC(°C) 25.000	
EXCESO %= 10.000	

ENTRADAS	SALIDAS
AIRE CALIENTE (D)	AIRE EXHAUSTO (E)
mD(kg/h)= 10729.180	mE(kg/h)= 12179.333
H <sub>2</sub> O(kg/h) = 288.406	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 1736.560
%H <sub>2</sub> O 2.688	%H <sub>2</sub> O 14.275
TD(°C) 365.000	TE(°C) 110.000
SLURRY (F)	FINOS DE DETERGENTE (G)
mF(kg/h)= 4812.164	mG(kg/h)= 62.000
H <sub>2</sub> O(kg/h) = 1684.254	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 3.100
%H <sub>2</sub> O 35.000	%H <sub>2</sub> O 5.000
TF(°C) 60.000	DETERGENTE SECO (L)
	mL(kg/h) 3390.000
	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 231.000
	%H <sub>2</sub> O 7.000

TORRE	
ENTRADAS	SALIDAS
AIRE CALIENTE (D)	AIRE EXHAUSTO (E)
mD(kg/h)= 10729.180	mE(kg/h)= 12179.333
H <sub>2</sub> O(kg/h) = 288.406	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 1736.560
%H <sub>2</sub> O 2.688	%H <sub>2</sub> O 14.275
TD(°C) 365.000	TE(°C) 110.000
SLURRY (F)	FINOS DE DETERGENTE (G)
mF(kg/h)= 4812.164	mG(kg/h)= 62.000
H <sub>2</sub> O(kg/h) = 1684.254	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 3.100
%H <sub>2</sub> O 35.000	%H <sub>2</sub> O 5.000
TF(°C) 60.000	DETERGENTE SECO (L)
	mL(kg/h) 3390.000
	H <sub>2</sub> O(kg/h) = 231.000
	%H <sub>2</sub> O 7.000

OTROS DATOS IMPORTANTES

AGUA A EVAPORAR	kg/h	1450.154
Q <sub>v</sub> NEC. PARA EVAP	J/h	2.75021E+09
PERDIDAS EN TORRE	J/h	1.37511E+08
PERDIDAS EN TORRE	%	5.000
PERDIDAS EN PLENUM	J/h	9.62574E+08
% PÉRDIDA EN PLENUM	%	35.000
PERDIDAS EN HORNO	J/h	1.35893E+09
% PÉRDIDA EN HORNO	%	49.412
eficiencia térmica	%	52.795

CP PROM AGUA	J/kg-°K	4202.920
CP AIRE	J/kg-°K	1023.673
ΔH VAPORIZACIÓN AGUA	J/kg	1686350.000
ΔH COMBUSTIÓN KEROSENO	J/kg	43263600.000
TS HORNO (°C)	°C	570.000
TE PLENUM(°C)	°C	450.000
TS PLENUM (°C)	°C	365.000



## Apéndice E 3.

### Cálculo de muestra del balance

#### BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA CUATRO TOBERAS

VARIABLES:

A = QUEROSENO

B = AIRE FRÍO

C = AIRE DE COMBUSTIÓN

D = AIRE CALIENTE

E = AIRE EXHAUSTO

F = PASTA DETERGENTE (SLURRY)

G = FINOS DE DETERGENTE

L = DETERGENTE SECO

$m_A$  = flujo másico de A (kg/h)

H = kg. de H<sub>2</sub>O/ kg de aire seco

#### 1. BALANCE EN DETERGENTE EN TORRE

ENTRADAS = SALIDAS

SOLIDOS EN F = SOLIDOS EN G + SOLIDOS EN L

$$(1-0.35)*m_F = (1-0.05)*m_G + (1-0.07)*m_L$$

$$0.65*m_F = 0.95*m_G + 0.93*m_L$$

Para un  $m_L$  de 3100 kg/h, se tiene:

$$m_F = (m_G*0.95 + m_L*0.93)/0.65 = 4,526 \text{ Kg/h}$$

#### 2. CALCULANDO EL FLUJO DE AGUA A EVAPORAR

$$\text{H}_2\text{O en F} = 0.35*m_F = 1584.1 \text{ kg/ h}$$

$$\text{H}_2\text{O en L} = 0.07*m_L = 217 \text{ kg/ h}$$

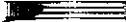
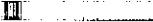
$$\text{H}_2\text{O en G} = 0.05*m_G = 3.1 \text{ kg/ h}$$

Entradas de agua en torre = Salidas de agua en torre

$$\text{H}_2\text{O}_{.F} + \text{H}_2\text{O}_{.D} = \text{H}_2\text{O}_{.E} + \text{H}_2\text{O}_{.G} + \text{H}_2\text{O}_{.L}$$

$$\text{El agua a evaporar} = \text{H}_2\text{O}_{.E} - \text{H}_2\text{O}_{.D} = \text{H}_2\text{O}_{.F} - \text{H}_2\text{O}_{.G} - \text{H}_2\text{O}_{.L}$$

Sustituyendo H<sub>2</sub>O en F, G Y L:



Agua a evaporar = 1364 kg/h

### 3. CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR 1364 kg/h DE AGUA

$$Q_{nec} = mCp dT + m\Delta H_{vap} + mCp dT = m[Cp dT + \Delta H_{vap} + Cp dT]$$

$$Cp \text{ agua} = 1.00385 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} = 4202.92 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

$$\Delta H_{vap} \text{ agua} = 1686350.0 \text{ J/kg}$$

$$Q_{nec} = 1364 \text{ kg/h} [4202.92 \text{ J/kg}^\circ\text{K} (100-60) + 1686350.0 \text{ J/kg} + 4202.92 \text{ J/kg}^\circ\text{K} (110-100)] = 2.58682 \times 10^9 \text{ J/h}$$

$$\text{Perdidas} = P_{torre} + P_{plenum} + P_{horno}$$

$$P_{torre} = 5\% * Q_{nec} = 0.05 * 2.58682 \times 10^9 = 1.2934 \times 10^8 \text{ J/h}$$

$$P_{plenum} = m_D * Cp_{aire} \Delta T = m_D * Cp_{aire} * (T_{salida} - T_{entrada})$$

$$Cp_{aire} = 0.24 * m_D + 0.45 * (1.44 * m_A + H * m_B) = 0.24 * m_D + 0.648 * m_A + 0.045 * m_B$$

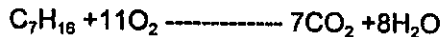
$$P_{plenum} = (0.24 * m_D + 0.648 * m_A + 0.0045 * m_B) * (450 - 365) * 4186.8$$

de igual manera:

$$P_{horno} = (0.24 * m_D + 0.648 * m_A + 0.0045 * m_B) * (570 - 450) * 4186.8$$

### 4. BALANCE DE MASE EN HORNO

reacción:



$$m_B + (7 * (12 + 32) / 100 + 11 * 32 / 100 * (\text{Exceso} / 100) + 1.44) * m_A = m_D$$

$$m_B + (4.52 + 3.52 * (\text{Exceso} / 100)) * m_A = m_D \quad \{\text{EQ} \# 1\}$$

### 5. BALANCE DE ENERGÍA

En Horno:

$$\Delta H_{aire} = Q_{combustión}$$

$$m_B * Cp_{aire} \Delta T = m_A * \Delta H_{combustión}$$

$$\Delta H_{combustión} = 43263600 \text{ J/kg}$$

$$\text{entonces: } m_B = 4.32636 \times 10^7 * m_A / [(0.24 + 0.45 * H) * 4186.8 * (T_{horno} - T_B)]$$

$$m_B = 4.32636 \times 10^7 * m_A / [(0.24 + 0.45 * 0.01) * 4186.8 * (570 - 25)]$$

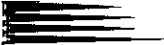
$$m_B = 77.547 * m_A \quad \{\text{EQ} \# 2\}$$

En Torre:

$$Q_{cedido} = Q_{necesario} + \text{Perdidas torre}$$

$$m_D * Cp_{aire} \Delta T = Q_{nec} + P_{torre}$$

$$m_D (0.24 + 0.45 (1.44 m_A + H * m_B) / m_D) * (T_D - T_E) * 4186.8 = Q_{nec} + P_{torre}$$



S



$$(0.24m_D + 0.648m_A + 0.45 \cdot 0.01m_B) = (Q_{nec} + P_{torre}) / [(T_D - T_E) \cdot 4186.8] \text{ (EQ \#3)}$$

Sustituyendo EQ #1 en EQ #3:

$$0.24 [m_B + (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100)) \cdot m_A] + 0.648m_A + 0.0045m_B = (Q_{nec} + P_{torre}) / [(T_D - T_E) \cdot 4186.8]$$

$$0.24 \cdot m_B + 0.24 \cdot (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100)) \cdot m_A + 0.648m_A + 0.0045m_B = (Q_{nec} + P_{torre}) / [(T_D - T_E) \cdot 4186.8]$$

$$0.2445 \cdot m_B + [0.24 \cdot (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100)) + 0.648] \cdot m_A = (Q_{nec} + P_{torre}) / [(T_D - T_E) \cdot 4186.8]$$

Sustituyendo EQ #2:

$$0.2445 \cdot 77.547 \cdot m_A + [0.24 \cdot (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100)) + 0.648] \cdot m_A = (Q_{nec} + P_{torre}) / [(T_D - T_E) \cdot 4186.8]$$

$$18.9602 \cdot m_A + [0.24 \cdot (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100)) + 0.648] \cdot m_A = (Q_{nec} + P_{torre}) / [(T_D - T_E) \cdot 4186.8]$$

$$m_A = [(Q_{nec} + P_{torre}) / ((T_D - T_E) \cdot 4186.8)] / [19.6082 + 0.24 \cdot (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100))]$$

Sustituyendo valores:

Exceso de 10%

$T_D = 365$ ,  $T_E = 110$

$$\text{Entonces } m_A = 2544.09 / 20.777 = 122.445 \text{ kg/h}$$

De EQ#2:

$$m_B = 77.547 \cdot 122.445 = 9495.2 \text{ kg/h}$$

De EQ #1

$$m_B + (4.52 + 3.52 \cdot (\text{Exceso}/100)) \cdot m_A = m_D$$

$$m_D = 10091.758 \text{ kg/h}$$

Sustituyendo valores en pérdidas:

$$\text{Pérdida Torre} = 1.29341 \times 10^8 \text{ J/h}$$

$$\text{Pérdida en Plenum} = 9.05387 \times 10^8 \text{ J/h}$$

$$\text{Pérdida en Horno} = 1.27819 \times 10^9 \text{ J/h}$$

$$\text{Eficiencia Térmica} = Q_{nec} / (Q_{nec} + \text{Pérdidas}) \cdot 100$$

$$\text{Eficiencia Térmica} = 52.27\%$$



