TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

BALANCE ENERGÉTICO DEL SET DE EVAPORADORES DE UNA UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE QUÍMICOS, MEDIANTE LA GENERACIÓN DE UN ALGORITMO QUE SIMULE EL PROCESO Y APLIQUE TECNOLOGÍA PINCH

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Franklin Baduy C.
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Nelson Ledesma
Ing. José Rodríguez

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por el Br. Chirinos C., Pedro D
Para optar al titulo
De Ingeniero Mecánico

Caracas, Mayo 2003

Chirinos C., Pedro D

BALANCE ENERGÉTICO DEL SET DE EVAPORADORES DE UNA UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE QUÍMICOS, MEDIANTE LA GENERACIÓN DE UN ALGORITMO QUE SIMULE EL PROCESO Y APLIQUE TECNOLOGÍA PINCH

Tutor Académico: Prof. Franklin Baduy C. Tutor Industrial: Ing. Nelson Ledesma. Ing. José Rodríguez.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica. 2003. 112 Pág.

Optimización, Simulación y Tecnología Pinch

En la actualidad, y debido a una serie de ajustes en los precios de los hidrocarburos, los costos asociados a la generación de vapor han venido incrementándose sustancialmente. Por esta razón, las industrias en el mundo han decidido implementar una serie de políticas en búsqueda de optimizar este consumo. El objetivo principal de este trabajo fue optimizar el consumo de vapor de un Set de Evaporadores de la Unidad de Recuperación de Químicos en una Planta de Papel. Para la optimización del proceso de transferencia de calor en los evaporadores se aplicó la tecnología Pinch.. Esta tecnología ha tenido gran aceptación tanto en fases de diseño de sistemas de intercambio de calor como en plantas ya operativas, ya que permite optimizar la transferencia de calor entre las corrientes de trabajo del sistema, ajustando, de acuerdo a una serie de procedimientos, las diferencias de temperatura entre éstas.

La primera etapa del trabajo consistió en hacer el levantamiento del sistema y realizar una distribución probabilística de sus variables operacionales: fluido, caudal, presión, temperatura y concentración, en varios momentos de la operación de la planta. La distribución probabilística de las variables operacionales se logró con la utilización de un software especializado que aplica métodos de simulación de Monte Carlo. En la segunda etapa, se desarrolló un algoritmo que, en función del licor negro que entra al Set, simula el proceso de combustión, determina, por medio de un balance de masa y energía, las variables de operación del Set de Evaporadores y, finalmente, aplica con ellas tecnología Pinch. El simulador fue programado en lenguaje C^{++}, ya que éste posee herramientas y funciones que le permiten al usuario visualizar y modificar valores de las variables termodinámicas involucradas en el proceso. La tercera etapa consistió en la aplicación del simulador con la data propia del sistema. A los resultados de este estudio se les aplicó el mismo análisis probabilístico que a la data medida, para poder analizarlos convenientemente.

Los resultados del estudio fueron bastante satisfactorios, ya que, a pesar de que el Set resultó ser muy estable y tener un consumo energético bastante moderado, se lograron en algunos casos reducciones de casi un 9 % en el vapor vivo que alimenta al Set, lo cual representa un ahorro de aproximadamente 80.000,00 $/año. Esto demuestra lo poderosa que es la tecnología Pinch en la optimización de procesos de intercambio de calor.

INDICE DE CONTENIDO

Pág.

LISTA DE FIGURAS…….....iii

LISTA DE TABLAS…….....vi

LISTA DE ANEXOS…….....viii

INTRODUCCIÓN…….....…ix

OBJETIVOS Y ALCANCES…….....xi

CAPITULO I. Proceso productivo y planteamiento del problema.

1.1. - General…….…….....1

1.2. - Proceso productivo Mocarpel…….....2

CAPITULO II. Fundamentos teóricos.

2.1. – Balance Energético…….....14

2.2. – Tecnología Pinch …….....15

CAPITULO III. Metodología.

3.1. – Caracterización preliminar.....24

3.2. - Estadísticas históricas(Estudio probabilístico).....26

3.2.1. - Concentración de licor negro.....26

3.2.2. - Temperaturas del licor negro.....26

3.2.3. - Flujos másicos de licor negro.....27

3.2.4. - Flujos másicos de vapor vivo.....27

3.3. – Generación de los sub programas.....27

3.3.1. - Combustión del licor negro.....27

3.3.2. - Balance de masa y energía del set.....28

3.3.3. - Tecnología Pinch.....30

3.4. - Algoritmo de simulación.....32

3.5. – Corridas del simulador…….....33

CAPITULO IV. Resultados y análisis.

4.1. – Caracterización preliminar…….....36

4.2. – Estudio probabilístico…….....44

4.3. – Generación de los sub programas…….....48

4.4. – Corridas del simulador…….....57

CAPITULO V. Conclusiones y recomendaciones.…….....63

BIBLIOGRAFÍA.…….....67

ANEXOS.…….....69

LISTA DE FIGURAS

Figura Pág

1.- Patio de astillas.....3

2.- Solvo fibrilizador.....5

3.- Lavadoras de pulpa.....6

4.- Filtro Goslin.....7

5.- Batidores.....8

6.- Mesa formadora.....9

7.- Set de Evaporadores.....11

8.- Caldera de recuperación de químicos.....12

9.- Curvas compuestas de un sistema.....17

10.- Diagrama de mallas de un sistema.....17

11.- Gran curva compuesta de un sistema.....21

12.- Balanza de microondas.....24

13.- Bomba calorimétrica adiabática.....25

14.- Subprograma caldera.....28

15.- Subprograma evaporadores.....30

16.- Subprograma Pinch.....31

17.- Etapas del simulador.....33

18.- Diagrama del simulador.....34

19.- Concentración del licor débil.....37

20.- Poder calorífico del licor negro.....39

21.- Caldera de recuperación de químicos.....44

22.- Levantamiento del sistema (consumo de vapor).....45

23.- Levantamiento del sistema (sólidos a la salida del Set).....46

24.- Levantamiento del sistema (sólidos a la entrada del Set).....47

25.- Diagrama de mallas del sistema.....53

26.- Corridas del simulador (consumo de vapor1).....57

27.- Corridas del simulador (consumo de vapor2).....58

28.- Corridas del simulador (consumo de vapor3).....59

29.- CCS1.....60

30.- GCCS1.....60

31.- CCS2.....61

32.- GCCS2.....61

LISTA DE TABLAS

Tabla Pág

1.- Tabla algoritmo de un sistema.....20

2.- Análisis elemental del licor negro.....36

3.- Media y Desviación estándar concentración del licor débil.....37

4.- Poder calorífico del licor a la salida de cada efecto.....38

5.- Secuencia de calentamiento del licor.....40

6.- Media y Desviación estándar del consumo del vapor de 50 psi.....45

7.- Media y Desviación estándar concentración del licor a la salida del Set 46

8.- Media y Desviación estándar concentración del licor a la entrada del Set.....47

9.- Tabla – algoritmo del sistema.....54

10.- Curvas compuestas caliente del sistema.....55

11.- Curvas compuestas frías del sistema.....55

12.-Pinch inicial.....56

13.- Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi (corrida 1).....57

14.- Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi (corrida 2).....58

15.- Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi (corrida 3).....59

LISTA DE ANEXOS

Anexo Pág

1.- Flujogramas del proceso..... 78

2.- Tecnología Pinch y la industria papelera.....84

3.- Reportes.....85

4.- Balances de masa y energía.....103

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más graves que la gran mayoría de las industrias en el mundo afronta en la actualidad está constituido por los altos costos asociados a la generación de energía. Es por ello que muchas empresas han comenzado a implementar políticas enfocadas a reducir u optimizar el consumo energético en sus plantas (Anexo 2). Las empresas del grupo papelero Jefferson Smurfit no son la excepción. En este orden se enmarca el siguiente trabajo, en el cual se realizó un estudio energético con la finalidad de optimizar el consumo de vapor en la Planta Mocarpel (Molinos de Cartón y Papel) perteneciente al grupo papelero Jefferson Smurfit. El estudio se realizó específicamente en el Set de Evaporadores de la Unidad de Recuperación de Químicos (URQ).

La Unidad de Recuperación de Químicos de Mocarpel es la única en la industria papelera venezolana. Básicamente está conformada por un Set de Evaporadores, una Caldera de Recuperación y la Planta de Caustificación y Horno de Cal. Con el objeto de alcanzar los objetivos trazados en la presente investigación fue desarrollado un simulador, el cual representa la herramienta fundamental utilizada. *Un simulador se define como un algoritmo que realiza una serie de operaciones que reproducen "fielmente" el proceso establecido*.[4]

La configuración de la Unidad de Recuperación de Químicos condiciona o establece las pautas a seguir para diseñar el simulador. De acuerdo a ellas, se planteó dividir el simulador en tres grandes fases.

Fase 1: Caldera de Recuperación. En esta primera etapa, sólo se utilizó una hoja de cálculos propuesta por TAPPI (organización encargada de normalizar todos los procesos de la industria papelera). Con una serie de datos de licor negro se determina la eficiencia en la generación de vapor de la Caldera. Así, en función de esta eficiencia, se determinan

cuáles son las condiciones más apropiadas del licor que sale de Evaporadores y entra a la Caldera.

Fase 2: se refiere al Set de Evaporadores. Aplicando principios termodinámicos básicos (balances de masa y energía), se determinaron todos los flujos másicos y temperaturas de las corrientes del sistema (vapor vivo y combinado, gases no condensables, condensado y licor negro), basados en las condiciones del licor negro requerido por la caldera. Adicionalmente, a partir del uso de métodos de programación lineal, se determina qué combinación de flujos másicos y temperaturas es capaz de minimizar el consumo de vapor.

Fase 3: se basa en el balance de masa y energía para hacer una síntesis a los intercambiadores de calor (Evaporadores), mediante la aplicación de la Tecnología Pinch (tecnología especializada en el área), la cual ha sido ampliamente aplicada en otros países y ha traído ahorros energéticos muy significativos.

Una vez creado el simulador se realizaron varias corridas del mismo. Los resultados de estas corridas fueron comparados con los valores de un levantamiento probabilístico de las condiciones operacionales, realizado durante el trabajo.

Finalmente, se obtuvieron resultados bastante alentadores, los cuales indican que es posible alcanzar reducciones en el consumo de vapor vivo por el orden del 9 %, únicamente variando ciertas condiciones operacionales. Esto evidencia las grandes ventajas de aplicar la tecnología Pinch en sistemas en donde ocurre intercambio de calor, además de los múltiples beneficios de la simulación de procesos industriales.

1.1. - General

La empresa Molinos de Cartón y Papel (Mocarpel) se encuentra situada en Carbonero, Estado Yaracuy, y forma parte de la división de Molinos de Smurfit Cartón de Venezuela, S.A. Ésta, a su vez, pertenece al grupo papelero internacional Jefferson Smurfit Corporation.

Mocarpel procesa madera de las especies Pino Caribe, Eucalipto y Gmelina, así como fibras secundarias (reciclado) destinadas a la producción de papeles tipo Liner y Médium. Éstos son utilizados en la fabricación de cartón corrugado por las empresas del grupo Smurfit, tanto dentro como fuera del país.

En la producción de papel se utiliza pulpa y vapor de agua, entre otras cosas, como materia prima. Anteriormente, y gracias a los bajos precios de los hidrocarburos, específicamente del gas natural, los costos asociados a la generación de vapor no eran representativos en función del beneficio que éste representa. Sin embargo, en la actualidad, y debido a una serie de ajustes en los precios de los hidrocarburos, los costos asociados a la generación de vapor han venido incrementándose sustancialmente. Por esta razón, la empresa ha decidido implementar una serie de políticas en búsqueda de la optimización del consumo energético en la planta, dentro del marco de esas políticas, el presente trabajo tiene como propósito fundamental contribuir con esa optimización. Se realizará un estudio piloto, en la Unidad de Recuperación de Químicos (URQ), con el fin de aplicar nuevas tecnologías que ayuden a lograr los objetivos planteados.

Los objetivos fundamentales del proceso que se lleva a cabo en ésta unidad son:

- Protección del medio ambiente a través del procesamiento de los subproductos del pulpeo.
- Recuperación de los químicos que no reaccionaron en dicho proceso.

- Generación de vapor, el cual es utilizado como suplemento en la producción de las calderas de potencia, sin llegar a ser indispensable para la planta de fuerza.

La Unidad de Recuperación de Químicos está conformada por tres unidades: Set de Evaporadores, Caldera de Recuperación, y Planta de Caustificación y Horno de Cal.

Para entender a cabalidad qué es la URQ y cuál es su función dentro del sistema operativo, se describe detalladamente el proceso de producción de Mocarpel.

1.2. – La planta Mocarpel (Molinos de Cartón y Papel)

El proceso productivo de Mocarpel está integrado, fundamentalmente, por seis (6) áreas:

1.2.1 – Patio de Madera y Astillas

1.2.2 – Planta de Pulpa
- Línea Química
- Línea Semiquímica

1.2.3 – Máquina de Papel
- Sistema de Preparación de Pastas
- Sección Húmeda
- Sección Seca

1.2.4 –Unidad de Recuperación de Químicos
- Set de Evaporadores
- Caldera de Recuperación
- Planta de Caustificación y Horno de Cal

1.2.5 – Casa de Fuerza

1.2.6 – Planta de Tratamiento de Efluente

1.2.1 - Patio de Madera y Astillas

La madera es recibida en la planta en una especie de cilindros, llamados rolas, de 2.4 m de largo, y de entre 7 y 55 cm de diámetro. Es almacenada en depósitos conocidos como cuarteles, para posteriormente ser procesada en el Patio de Astillas (Anexo 1.1). Allí son

sometidas a un proceso de corte denominado astillado, que se inicia con la eliminación de impurezas (arena, piedra, etc.), mediante un proceso de lavado.



Figura 1 Patio de Astillas

Luego se hace pasar por un detector de metales para verificar la presencia de materiales metálicos, tales como alambres, clavos, etc. Posteriormente, las rolas son llevadas al astillador por transportadoras de rodillos, mediante los cuales se pueden separar, por gravedad, materiales de desecho (ramas, cortezas, hojas) que caen a otros transportadores para ser retirados del proceso. Este astillador corta las rolas en astillas de 5/8” × 3/4" × 1/4"; luego éstas son trasladadas hacia un seleccionador de astillas (Zaranda Vibratoria con orificio de 1 ¾”), donde son clasificadas de acuerdo a las dimensiones especificadas. Las astillas rechazadas se someten a un proceso de reastillado; el aserrín y las astillas de menor tamaño se desechan, mientras que las aceptadas se envían mediante transportadores al Patio de Astillas para su almacenamiento.

1.2.2 –Planta de Pulpa

La Planta de Pulpa consta de dos líneas de producción: Línea Química (por Batch) y Línea Semiquímica (Continua).

Línea Química: Es el proceso donde se imparte un mayor tratamiento químico a la madera para generar la deslignificación de la misma, con lo cual se obtiene un rendimiento del 55% (base madera seca). La deslignificación de la madera es un proceso químico en el cual se retira la lignina a la madera. Esta sustancia es nociva para el proceso, por lo que es considerada un componente de la madera no apto para la fabricación de papel.

La Línea Química cuenta con seis (6) digestores Batch, con los que se procesa madera de fibra larga (Pino Caribe), (Anexo 1.2). Las astillas del patio se transportan hasta llegar al Tripper, que es el equipo encargado de descargarlas en el digestor seleccionado por el operador. En el digestor las astillas son sometidas a un proceso de lixiviación selectiva por la acción de la temperatura y los químicos del proceso, principalmente sales de sodio, en un tiempo de una hora una vez alcanzada la temperatura máxima. Durante este tiempo los químicos reaccionan con la lignina y forman compuestos de lignina solubles en medio alcalino y más fáciles de extraer, lo que deja libre a la celulosa que constituye la parte esencial del producto final.

La pulpa obtenida es enviada a un contenedor denominado tanque de soplado, donde ocurre una separación de las fibras. Luego se hacen pasar por el Solvo Fibrilizador (Fig. 2) donde se ejerce una presión mecánica para fragmentar las astillas que aún no han sido separadas.



Figura 2 Solvo Fibrilizador

El paso siguiente es la refinación, la cual se realiza mediante los refinadores de discos. Las fibras se abren y se separan en unidades individuales. Posteriormente, éstas se someten a una clasificación para separar la porción gruesa que requiere de mayor refinación. Una vez clasificada, la pulpa se envía a la operación de lavado en tres etapas, para lo cual se dispone de tres lavadoras (Fig. 3). Dicha operación se realiza en contracorriente, utilizando licor negro débil en las dos primeras etapas y agua caliente en la última. Como resultado del lavado se obtiene el licor negro, componente que junto con el vapor de agua constituye un elemento fundamental de este trabajo. Se denomina licor negro por su color oscuro; está compuesto por una parte de materia orgánica producto de la extracción de la lignina en el proceso de digestión y una parte inorgánica, principalmente sales de sodio como resultado de la Soda Cáustica y el Sulfuro de Sodio, que se utiliza en la digestión. Al concluir el lavado, la pulpa es almacenada en la torre de alta densidad, desde donde es bombeada hacia el sistema de preparación de pastas.



Figura 3 Lavadoras

Línea Semiquímica: se denomina de esta manera porque se da un ligero tratamiento químico a la madera. Impera un tratamiento mecánico de refinación (Anexo 1.3), con el cual se obtiene un rendimiento mayor del 70 % (base madera seca).

La Línea Semiquímica procesa maderas de fibras cortas (Eucalipto, Gmelina y Tropical) en forma de astillas, las cuales son sometidas a un pre-acondicionamiento. El proceso se inicia con un lavado para eliminar la mayor cantidad de aserrín y otras impurezas que puedan traer del proceso previo. Posteriormente, se les inyecta vapor en una tolva de precalentamiento para ablandarlas y facilitar su carga al digestor continuo. Éste consta de dos tubos horizontales conectados en serie; en su interior posee un tornillo por medio del cual las astillas recorren la sección destinada para la separación de la lignina. A 167º C aproximadamente y en un tiempo de residencia de 20 minutos, ocurre la reacción de deslignificación generada por la presencia de los químicos del proceso.

La pulpa cruda es desfibrada y a continuación sufre una expansión en el tanque de soplado debido a la diferencia de presión existente. La pulpa es diluida en el fondo del tanque de soplado, para luego ser bombeada a la etapa inmediata del proceso de refinación,

que se realiza con los refinadores de discos. Por último, se somete a una operación de lavado similar a la ocurrida en la Línea Química de donde se obtiene el licor negro. Una vez lavada, la pulpa tiene dos alternativas para ser almacenada: en una torre de alta densidad o en una prensa, donde se le da la consistencia necesaria para almacenarla en el Patio de Pulpa prensada.

El licor negro resultante de las etapas de lavado de ambas líneas de producción de pulpa, con un porcentaje de sólidos totales aproximados de 10.5 %, se hace pasar por el filtro Goslin (Fig. 4), para disminuir los sólidos suspendidos que pueda llevar consigo hasta valores de 80 p.p.m. Luego es enviado a los tanques de almacenamiento en el área de Evaporadores de la Planta de Recuperación de Químicos.



Figura 4 Filtro Goslin

1.2.3 – Máquina de Papel

La máquina papelera tiene como finalidad la fabricación de papeles de alto gramaje que constituyen la materia prima para la fabricación de cajas de cartón. Se usan, en términos de fabricación, capas externas Liner y corrugado interno Medio, para las empresas corrugadoras del grupo, tanto dentro como fuera del país.

El proceso de fabricación de papel (Anexos 1.4) se divide en las siguientes etapas:

Sistema de preparación de pastas: El papel reciclado es desfibrado en el área de Batidores (Fig. 5), para obtener una suspensión de fibras en agua, que luego es bombeada hacia los limpiadores de alta densidad en donde se separan los contaminantes pesados.



Figura 5 Batidores

Concluida esta etapa, la pasta en forma de suspensión es enviada hacia los limpiadores de baja densidad, donde son removidos los contaminantes livianos. Posteriormente, la pasta pasa a una batería de limpiadores centrífugos.

La siguiente etapa es la refinación de las pulpas mediante unos refinadores de discos, en los cuales y por acción mecánica la fibra recibe un tratamiento que le confiere las propiedades físicas requeridas de acuerdo a las especificaciones del papel a fabricar.

Sección Húmeda: Incluye la mesa formadora (Fig. 6) y la Sección de Prensas. La pasta es alimentada uniformemente a lo ancho de la malla de la mesa formadora, donde las fibras se entrelazan y forman la red fibrosa que conforma la hoja de papel, mientras que el agua es removida en forma gradual a lo largo de la unidad formadora. La red fibrosa abandona la unidad formadora para pasar a una operación de prensado mediante el uso de

tres prensas. Además de extraerse agua a la hoja de papel, se consolidan sus propiedades físicas, tales como resistencia y densidad.



Figura 6 Mesa formadora

Sección Seca: Al salir de las prensas, la hoja de papel pasa a los secadores, constituidos por cilindros rotatorios presurizados, alimentados con vapor. El secado de la hoja de papel ocurre por contacto directo de ésta con la superficie caliente del cilindro del secador. A continuación, la hoja pasa a la Calandria que consta de cuatro rodillos a través de los cuales se hace pasar la hoja para darle un acabado final que consiste en mantener un espesor uniforme y una superficie lisa en la hoja. A la salida de la Calandria, pasa a la bobinadora, en donde el papel es enrollado en bobinas para un mejor manejo.

1.2.4 – Casa de Fuerza

Esta área es la encargada de suministrar los siguientes servicios:

Vapor: El vapor se utiliza para la generación de electricidad y en los procesos de producción. Esta fuente energética se genera en cuatro calderas acuotubulares compactas, y su combustible principal es gas natural.

Electricidad: Para brindar este servicio, se cuenta con dos turbo-generadores de 12.5 MW y 4160 V cada uno. La electricidad generada es enviada a las subestaciones de distribución en donde se reduce la tensión de 4160 V a 480 V y se alimentan los centros de control de motores.

Aire Comprimido: Se obtiene a partir de dos Compresores Centrífugos, uno de ellos en servicio y el otro en reserva. El 30 % del aire se seca para utilizarlo en los instrumentos de control, y el resto se usa como aire de servicios generales.

1.2.5 – Unidad de Recuperación de Químicos

Tal y como se mencionara al principio de este capítulo, los objetivos fundamentales del proceso de Recuperación de Químicos (Anexo 1.5) son la protección del medio ambiente a través del procesamiento de los subproductos del pulpeo, la recuperación de los químicos que no reaccionaron en dicho proceso y, finalmente, la generación de vapor. Éste es utilizado como suplemento en la producción de las calderas de potencia, sin llegar a ser indispensable para la planta de fuerza.

La Unidad de Recuperación de Químicos está conformada por tres áreas operativas: Set de Evaporadores, Caldera de Recuperación y Planta de Caustificación y Horno de Cal.

El ciclo de recuperación se inicia con la recepción del licor negro débil (10 a 10.5 % de sólidos totales) proveniente de la Planta de Pulpa. Posteriormente, el licor pasa al proceso de evaporación, cuya finalidad es elevar la concentración del licor negro de 10.5 a 65 %.

La operación de Evaporación: Se lleva a cabo en un Set de Evaporadores (Fig. 7) de múltiples efectos (cinco). El primer efecto o concentrador (denominado así por el hecho de ser el punto de alimentación de vapor vivo proveniente de casa de fuerza) es la etapa final de concentración del licor negro. Al salir de allí, el licor concentrado sufre una expansión.

Luego es almacenado en tanques, donde por contacto indirecto con vapor de 50 psi, mantiene la temperatura que le permite la fluidez para la posterior operación de bombeo hacia los tanques de mezcla en la caldera de recuperación.

Los cuatro efectos restantes del set son alimentados con vapor combinado, que es el vapor resultante del proceso de evaporación en cada uno de los efectos previos.



Figura 7 Set de evaporadores

La Caldera de Recuperación de Químicos: Es una unidad Babcock and Wilcox (Fig. 8), cuya función principal es quemar la materia orgánica disuelta en el licor negro y reducir los compuestos de azufre. Básicamente, el sulfato de sodio (Na_2SO_4) se reduce a sulfuro de sodio (Na_2S). La reacción de combustión se lleva a cabo en el hogar de la caldera, a través de la atomización del licor negro, mediante boquillas especiales para tal fin. Éstas permiten la formación de pequeñas gotas que, a su vez, sufren los procesos de secado, pirólisis (descomposición térmica de los compuestos químicos) y quemado. A medida que ocurre esta última etapa, las partículas disminuyen su tamaño dejando solamente compuestos inorgánicos en el fundido que se forma, el cual fluye al tanque de disolución. Al ponerse en

contacto con el licor débil de lavado, se da lugar a la formación de licor verde, denominado así por su apariencia verdusca.



Figura 8 Caldera de recuperación de Químicos

El circuito de Caustificación: Es la etapa final del ciclo de recuperación de químicos. De su funcionamiento depende la rentabilidad económica del proceso. Su operación debe ser tal que garantice el suministro de la cantidad y calidad de licor blanco utilizado en la planta de pulpa para el proceso de lavado. El proceso como tal involucra una serie de operaciones de naturaleza tanto físicas como químicas, que se inician cuando el licor verde (proveniente del tanque de disolución) alimenta al clarificador, en donde se separan las impurezas del mismo. Este licor verde clarificado alimenta al apagador de cal, en donde se pone en contacto con cal viva (CaCO) proveniente de los Silos de cal, con el carbonato de sodio para producir Hidróxido de Sodio y Carbonato de Calcio ($CaCo_3$), llamado este último lodos de cal. Se alimenta el clarificador de licor con la lechada obtenida de la reacción anteriormente descrita; por diferencias de densidad, se separan el licor blanco clarificado y los lodos de cal. El primero se envía a la planta de pulpa para utilizarse como licor de cocción, y el segundo va a ser espesado para luego alimentar el horno de cal.

En el Horno de Cal se alimentan los lodos de cal. Allí el CaCo es convertido en CaO y CO_2 por efecto térmico, para posteriormente almacenar el CaO en los silos de cal viva.

Actualmente, Smurfit Cartón de Venezuela, en su división Mocarpel, cuenta con una unidad de recuperación de químicos. Fue especialmente diseñada para recuperar los químicos contenidos en un tipo de licor muy específico, constituido en un 40 % de madera suave con un poder calorífico de 3500 kcal/kg y 60 % de eucalipto con 2200 kcal/kg.

No obstante, del proceso productivo de Mocarpel se derivan tres tipos distintos de licor (como resultado del pulpeo de Eucalipto, Pino y Gmelina). Adicionalmente, éstos se mezclan de forma aleatoria en un tanque antes de entrar a los Evaporadores. De tal manera, el licor a ser tratado tiende a ser muy distinto al licor con el cual se realizó el diseño.

Esta situación trae como consecuencia que tanto las condiciones de operación como la eficiencia de la unidad varíen de manera abrupta en función del licor que entra en la misma, lo que genera un consumo energético muy elevado.

Evidentemente ésta es un área neurálgica de la planta. Por ello, el estudio se realizó específicamente en ella, de acuerdo a las prioridades establecidas por la gerencia de la planta. Se aplicaron nuevas tecnologías especializadas en la optimización del consumo energético que pueden ser igualmente aplicadas a intercambiadores de calor, por ejemplo en el Set de Evaporadores.

2.1. - Conceptos Fundamentales:

2.1.1. - Fundamentos Termodinámicos:

La termodinámica es la ciencia que trata con el calor y el trabajo, además de las propiedades de las sustancias que se relacionan con estos. Por ser una ciencia, su base es la observación experimental, estas observaciones se han formalizado en ciertas leyes básicas que serán presentadas a continuación.

Ley Cero de la Termodinámica: Establece que cuando dos cuerpos tienen igualdad de temperaturas con un tercer cuerpo, necesariamente la temperatura entre ellos será la misma, lo que permite asegurar que estos dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico. Esta ley es la base de la medición de la temperatura.

Primera Ley de la Termodinámica: Es conocida como la ley de la conservación de la energía, y establece que durante cualquier ciclo que experimente un sistema o masa de control, la integral cíclica del calor es proporcional a la integral cíclica del trabajo, lo que puede ser expresado como:

$$\oint Q = \oint W \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Si el sistema o masa de control experimenta un cambio de estado, y a sabiendas que la función Q-W depende únicamente de los estados inicial y final y no de la trayectoria seguida entre los estados (como se demuestra en los anexos). Se concluye que esta es una función

punto y, por lo tanto, es la diferencial de una propiedad de la masa. Esta propiedad es la energía de la masa y se representa por el símbolo E. Así, se puede escribir:

$$_1Q_2 = E_2 - E_1 + _1W_2 \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Una característica importante en el estudio de la termodinámica, es la consideración de la energía cinética (EC) y potencial (EP) por separado y después considerar todas las formas de energía en una sola propiedad que se llama energía interna (U), así pues se puede escribir

$$E = U + EC + EP \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Por lo tanto la primera ley de la termodinámica para un cambio de estado se puede representar entonces como

$$\delta Q = dU + d(EC) + d(EP) + \delta W \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Segunda Ley de la termodinámica: En esta se establece que el trabajo se puede llevar a cabo por la transferencia de calor solamente si hay dos niveles de temperatura y el calor se transfiere desde el nivel de alta temperatura hacia el nivel de baja temperatura.

Tercera Ley de la Termodinámica: Trata con la entropía de las sustancias a la temperatura del cero absoluto, y en esencia, afirma que la entropía en un cristal es cero en el cero absoluto, lo que se traduce desde el punto de vista estadístico como que el cristal tiene el máximo grado de orden y por lo tanto su energía térmica es mínima.

Ya definidas las leyes de la termodinámica es necesario definir algunos conceptos básicos que facilitaran la comprensión y mejor aplicación de estas leyes.

Energía: La energía es un concepto fundamental, como la masa o la fuerza, y como es común en estos conceptos, es muy difícil de definir. Sin embargo, de manera fundamental se ha definido como la capacidad de producir un efecto. Cuando se considera desde el punto de vista molecular, se identifican tres formas generales de energía:

1. - Energía potencial intermolecular, que se asocia con las fuerzas entre las moléculas.
2. - Energía cinética molecular, que se asocia con la velocidad traslacional de las moléculas individuales.
3. - Energía intramolecular (la que esta dentro de las moléculas individuales), que se asocia con la estructura molecular y atómica con las fuerzas relacionadas con ella.

La Sustancia Pura: Una sustancia pura es la que tiene una composición química homogénea e invariable. Puede existir en mas de una fase, pero la composición química es la misma en todas las fases. Así, el agua liquida, una mezcla de agua liquida y vapor de agua, y una mezcla de hielo y agua liquida son todas sustancias puras, ya que cada fase tiene la misma composición química. Por su parte una mezcla de aire liquido y aire gaseoso no es una sustancia pura, por que la composición química de estas es diferente.

Propiedades independientes de una sustancia pura: Una razón importante para introducir el concepto de una sustancia pura es que el estado de una sustancia pura, compresible, simple (es decir, una sustancia pura en ausencia de movimiento, gravedad y efectos de superficie, magnéticos o eléctricos) se define por dos propiedades independientes.

Por ejemplo, si se especifican temperatura y el volumen especifico del vapor sobrecalentado, se determina el estado del vapor.

Definición de trabajo: Casi siempre el trabajo se define como la acción de una fuerza F a través de un desplazamiento x, donde el desplazamiento es en la dirección de la fuerza, es decir,

$$W = \int F dx \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

Sin embargo en términos termodinámicos, el trabajo se define de la siguiente forma: un sistema realiza trabajo si el único efecto es sobre el entorno (todo lo que es externo al sistema). El trabajo que un sistema realiza se considera positivo y aquel que se aplica sobre el sistema se considera negativo.

Definición de Calor: El calor se define como la forma de energía en que, a una temperatura dada, se transfiere a través de los limites de un sistema a otro sistema (o a su entorno) que está a una menor temperatura y que sucede en virtud de la diferencia de temperatura entre los dos sistemas.

Energía Interna, una Propiedad Termodinámica: La energía interna es una propiedad extensiva, por que depende de la masa del sistema, de modo semejante, las energías internas y potencial son propiedades extensivas. El símbolo U representa la energía interna de una determinada masa de sustancia. Según acuerdos empleados para las propiedades extensivas el símbolo u representa la energía interna por unidad de masa.

La Propiedad Termodinámica de la Entalpía: La transferencia de calor durante un proceso de cambio de estado puede expresarse en términos del cambio en la cantidad de U +

PV entre los estados inicial y final. Como todas estas cantidades son propiedades termodinámicas, es decir, funciones solo del estado del sistema, sus combinaciones también deben tener estas mismas características, por lo tanto se define la propiedad extensiva de la entalpía:

$$H = U + PV \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

La entalpía al ser una propiedad, es un estado o función punto y su uso en el calculo de la energía interna (U) en el mismo estado no está relacionado con el proceso que se lleve a cabo ni esta relacionado con el mismo. Por convención, la entalpía del liquido saturado tiene el símbolo h_f, la del vapor saturado h_g, y el aumento de entalpía durante la evaporación es h_{fg}.

Calores Específicos: Se define como la cantidad de calor que se requiere por unidad de masa para elevar la temperatura de una sustancia de composición constante en un grado. Basados en la siguiente ecuación

$$\delta Q = dU + PdV \qquad \text{(Ecuación 7)}$$

Es posible determinar que esta expresión puede ser evaluada para dos casos especiales separados.

1.- Volumen constante, en donde el termino del trabajo (PdV) es cero, de modo que el calor especifico a volumen constante es:

$$C_v = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right) \qquad \text{(Ecuación 8)}$$

2. - Presión constante, para el cual se puede integrar el termino de trabajo y los términos PV resultantes en los estados inicial y final se pueden asociar con los términos de la energía interna, lo que lleva a la conclusión de que la transferencia de calor se puede expresar en términos del cambio de entalpía. El calor especifico correspondiente a presión constante es:

$$C_p = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \qquad \text{(Ecuación 9)}$$

Las ecuaciones ocho y nueve solo contienen propiedades termodinámicas, de donde se concluye que los calores específicos a volumen constante y a presión constante deben ser en sí propiedades termodinámicas, por lo tanto constituyen una definición independiente del proceso particular que lleva a ello.

2.1.2. - Los Fluidos y algunas de sus propiedades:

Las sustancias que llamamos fluidos pueden ser líquidos o gases. Un liquido puede ser definido como un estado de la materia en el que las moléculas están relativamente libres para cambiar de posición unas respecto a otras, pero restringidas por fuerzas de cohesión, con el fin de mantener un volumen relativamente fijo. Un gas se define como el estado de la materia en el que las moléculas prácticamente no se hallan restringidas por fuerzas de cohesión, por lo que el gas no tiene forma ni volumen definido.

Los fluidos estudiados en este trabajo son aquellos líquidos y gases que se mueven bajo la acción de un esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que este sea, adicionalmente es conveniente suponer que estos fluidos están distribuidos uniformemente dentro de toda la región de interés, es decir, el fluido se trata como un medio continuo. La propiedad primaria que se utiliza para determinar si el supuesto de un continuo es apropiado es la densidad.

Para comprender a cabalidad el comportamiento de los fluidos es importante definir algunas propiedades esenciales.

Densidad y peso específico: La densidad es una propiedad que está definida como una relación de masa por unidad de volumen. Una propiedad de los fluidos relacionada directamente con la densidad es el peso especifico γ o peso por unidad de volumen, que se define como

$$\gamma = \rho g \qquad \text{(Ecuación 10)}$$

En donde g representa la gravedad local.

Viscosidad: Puede pensarse como la "pegajosidad" interna de un fluido; es una de las propiedades que controla la cantidad de fluido que puede transportarse por una tubería durante un periodo especifico, y explica las perdidas de energía asociadas al transporte de fluidos en ductos, canales y tubos. La razón de deformación de un fluido está ligada directamente a la viscosidad del mismo. Considerando un flujo en el que las partículas de fluido se mueven en la dirección *x* con diferentes velocidades, de modo que las velocidades *u* de las partículas varían con la coordenada *y*. Para un campo de flujo tan simple, en el que $u = u(y)$. Podemos definir la viscosidad *u* del fluido con la relación

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad \text{(Ecuación 11)}$$

De donde τ representa el esfuerzo cortante y $\frac{du}{dy}$ representa un gradiente de velocidad.

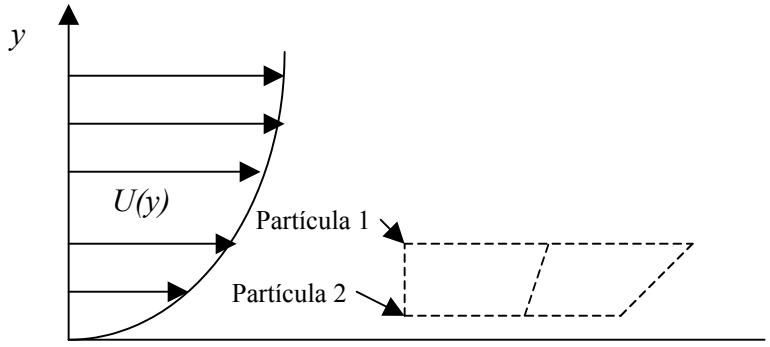


Figura 9 Movimiento relativo de dos partículas de un fluido en presencia de esfuerzos cortantes

Si el esfuerzo cortante de un fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad, como en la ecuación 11, se dice que el fluido es un fluido newtoniano. La mayor parte de los fluidos comunes como el aire, el agua y el petróleo son newtonianos. Los fluidos no newtonianos, con relaciones esfuerzo cortante / razón de deformación, como las que se muestran en la figura 4

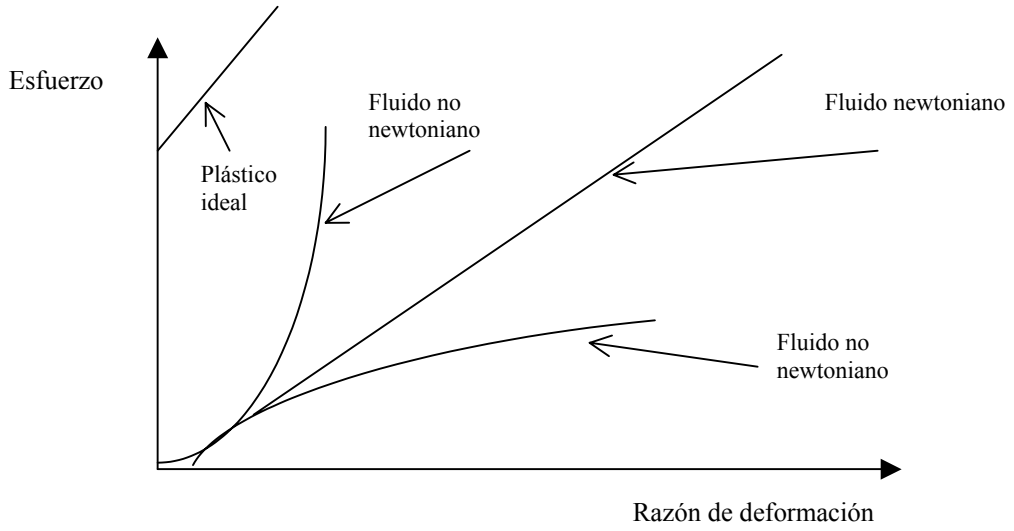


Figura 10 Fluidos newtonianos y no newtonianos

Un efecto importante de la viscosidad es hacer que el fluido se adhiera a la superficie, esto se conoce como condición de no-deslizamiento. La viscosidad depende mucho de la temperatura en los líquidos en los que las fuerzas de cohesión desempeñan un papel dominante. En la gran mayoría de los casos la viscosidad varia en función de la temperatura según la ecuación de Andrade

$$\mu = C_1 e^{c2/T} \qquad \text{(Ecuación 12)}$$

En donde C_1 y C_2 se determinan a partir de mediciones.

Compresibilidad: Trata de la deformación causada sobre un fluido debido a los cambios de presión. Todos los fluidos se comprimen si la presión aumenta, y el resultado es un aumento en la densidad. Una forma muy común de describir la compresibilidad de los fluidos es con la utilización del módulo de elasticidad volumétrico "B". El módulo volumétrico también es muy utilizado para calcular la velocidad del sonido en un líquido, la cual está dada por

$$C = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad \text{(Ecuación 13)}$$

Tensión superficial: Es una propiedad que resulta de las fuerzas de atracción entre las moléculas; como tal se manifiesta solo en los líquidos en una interfaz, por lo general en una interfaz de liquido – gas. Esta fuerza mantiene una gota de agua suspendida en una varilla y limita el tamaño de la gota que puede sostenerse; además, hace que las pequeñas gotas de un rociador o atomizador asuman formas esféricas.

Presión de vapor: Cuando una cantidad pequeña de liquido se coloca en un recipiente cerrado, cierta fracción del liquido se vaporiza. La vaporización cesa cuando se alcanza un equilibrio entre los estados liquido y gaseoso de la sustancia contenida en el recipiente o, en otras palabras, cuando el número de moléculas que escapan de la superficie del agua es igual al número de moléculas que regresan. La presión causada por la moléculas que están en estado gaseoso es la presión de vapor.

Flujos viscosos y no viscosos: Un flujo no viscoso es uno en el que los efectos de la viscosidad no afectan significativamente el flujo, y por lo tanto no se toma en cuenta. En un flujo viscoso los efectos de la viscosidad son importantes y no pueden despreciarse. Los flujos viscosos incluyen la amplia gamma de los flujos internos, como los flujos en tuberías, conductos y canales abiertos.

Flujos laminares y turbulentos: Un flujo viscoso puede clasificarse como laminar o turbulento. En el flujo laminar el fluido se mueve sin que haya una mezcla significativa de partículas de fluido vecinas. En un flujo turbulento los movimientos del fluido varían de forma irregular, de modo que las cantidades como velocidad y presión exhiben variaciones aleatorias con las coordenadas de espacio y tiempo. La razón por la cual un flujo puede ser

laminar o turbulento tiene que ver con lo que sucede ante una alteración pequeña del flujo; esta alteración depende de tres parámetros físicos que describen las condiciones de flujo, estos parámetros son la longitud de la tubería (L), la velocidad (V) y la viscosidad (ν), estos pueden combinarse en uno solo que sirve para predecir el régimen de flujo. Esta cantidad en el número de Reynolds y viene dado por

$$\mathrm{Re} = \frac{VL}{\nu} \qquad \text{(Ecuación 14)}$$

En donde si el numero de Reynolds del flujo es menor que el Re_{crit} el flujo es laminar, y si por el contrario el numero de Reynolds del flujo es mayor que el Re_{crit} el flujo es turbulento.

2.1.3. - El Vapor de agua*:*

Es agua en fase gaseosa, pero con un alto contenido de energía térmica, que es proporcional a la presión. Cuando esta sobrecalentado el incremento en la temperatura le aporta una cantidad de energía adicional.

Para comprender los usos y características del vapor de agua en los procesos energéticos se presenta la tabla numero uno

	Propiedad	Unidad (s.internacional/s.ingles)	Símbolo	Descripción
1	Flujo o Caudal	kg/h lb/h	W	Volumen másico fluyendo por una tubería por unidad de tiempo
2	Temperatura	ºC ºF	T	Nivel térmico en el cual se encuentra el agua en la fase, es independiente de la temperatura

3	Presión	Pa Psi	P	Fuerza ejercida por un fluido sobre la pared del recipiente que lo encierra
4	Volumen Especifico	m^3/Kg Pie^3/lb	v	Volumen por unidad de masa ocupado por 1 Kg de vapor. Varia en función de la presión y la temperatura
5	Entalpía	kj/kg Btu/lb	h	Cantidad de calor contenida por el agua en cualquiera de sus fases.
6	Re evaporado	kg/h Lb/h	F	Se genera cuando el condensado es descargado a un recipiente con menor presión, debido a los cambios de entalpía en la nueva condición una parte se transforma nuevamente en vapor
7	Condensado	kg/h Lb/h		Es producido durante el cambio de la fase gaseosa a la líquida, cuando el vapor cede calor latente durante el intercambio térmico, sin embargo este conserva calor sensible

Tabla 1 Características del vapor

Al hablar del vapor de agua es interesante definir dos conceptos que tienden a confundirse con facilidad:

Ebullición: Es un fenómeno de transporte de gran complejidad, en que existe transferencia de calor desde un foco, generalmente una superficie hasta la masa de liquido. Se produce un calentamiento convectivo del liquido hasta la temperatura de saturación. A continuación se pone en marcha el mecanismo de formación de burbujas, las burbujas o núcleos de vapor nacen, se desarrollan y acaban desprendiéndose. Por tanto, tendremos como fenómeno añadido el movimiento de los núcleos de vapor.

Evaporación: La evaporación de un liquido es un fenómeno diferente a la ebullición. Tiene lugar a cualquier temperatura y presión, y depende, fundamentalmente, de la difusión de

vapor desde la capa pelicular (fina aire de condensado que se forma en las paredes de las superficies) de aire en contacto con el líquido hacia la zona de aire circundante.

2.1.4. - Licor negro:

Es el líquido que se genera en el proceso de pulpeo. Tiene un intenso color negro, variando su tono por difusión a café – rojizo. Cuando se encuentra a altas concentraciones es muy viscoso y tiene una marcada tendencia a formar espuma.

El licor negro esta constituido por impurezas orgánicas que se han hecho solubles en el cocimiento, principalmente sales de sodio (soda cáustica y el sulfuro de sodio)

Los sólidos disueltos de los licores negros están constituidos en su mayoría por materiales de naturaleza lignínica. Se trata de ligninas modificadas en distinto grado a las que se les denomina álcali – ligninas.

La composición de los licores negros depende de las condiciones de cocimiento y del material procesado. Los licores negros de los procesos alcalinos no se deben desechar, deben ser recuperados para la regeneración de los productos químicos de cocción a partir de sodio; ya que el contenido de Na_2O del licor no se altera en el proceso de cocción.

El licor negro y los condensados del licor contienen componentes tóxicos que afectan al medio ambiente en el que interactúen, la alta toxicidad del licor es causada por los ácidos resinosos y los insaturados ácidos grasos. Debido a su toxicidad los derrames de licor deben ser evitados.

Los licores negros provenientes del cocimiento originan sales inorgánicas, una gran cantidad de estas sales causan el crecimiento descontrolado de algas debido a su alto contenido de nitrógeno y fósforo.

Cuando el contenido de sólidos en el licor negro es bajo se le conoce como licor negro débil, y cuando el contenido de sólidos es alto se le denomina licor negro fuerte.

2.1.5. - Intercambiadores de calor (Evaporadores):

Un sistema de evaporación está conformado por un conjunto de Evaporadores, en este sistema el proceso ocurre por el hervor de una solución acuosa a presión constante, para ello es necesario un aumento significativo de calor, denominado calor latente de vaporización.

La función de los sistemas de evaporación es proveer los medios para transferir calor al liquido y permitir que ocurra el proceso de vaporización del liquido.

El hervor por transferencia de calor y la vaporización flash son los dos procesos por medio de los cuales la vaporización ocurre en los sistemas de evaporación. En el caso particular de los Evaporadores de licores provenientes del pulpeo el hervor debido a la transferencia de calor es el método mas empleado, aquí el licor es transformado en vapor en las superficies de intercambio de la carcaza o cuerpo de los Evaporadores.

La vaporización flash ocurre como resultado de un flujo que entra a una región en donde la presión es menor que la presión de saturación del liquido. En este caso el calor requerido proviene del calor sensible liberado durante el enfriamiento del liquido. La vaporización flash ocurre en recipientes cerrados.

El desarrollo de los procesos de evaporación han venido acompañados comercialmente por una gran variedad de diseños de equipos, en la industria de pulpa y papel los mas utilizados son los de película ascendente, los de película descendente y los de circulación forzada, en los dos primeros la vaporización ocurre por la transferencia de calor en las

superficies de calentamiento, mientras que en el ultimo ocurre por el calor agregado en forma de calor sensible en un recipiente aparte.

2.1.6. - Generadores de vapor:

Un generador de vapor es un equipo que consta de diferentes elementos destinados a la producción de vapor de agua o de cualquier otra clase de vapor a partir de su fase líquida. Estos elementos son el hogar o cámara de combustión, la caldera, los recalentadores de vapor, el economizador y el calentador de aire.

En el hogar se produce la combustión de un combustible. La caldera es un intercambiador de calor en el que los gases de la combustión calientan la fase líquida hasta su transformación en vapor. La denominación "caldera" se ha vulgarizado y se utiliza frecuentemente para designar a todo el equipo e incluso a aquellos que solo producen agua caliente. El recalentador del vapor calienta el vapor saturado hasta el estado de vapor recalentado y, opcionalmente, el economizador precalienta el agua de alimentación de la caldera. Finalmente, el calentador de aire calienta el aire necesario para la combustión.

En términos generales las calderas se clasifican en pirotubulares y acuotubulares. Las pirotubulares son aquellas en las que los humos de la combustión circulan por el interior de los tubos, y el agua, por el exterior. En general, se trata de calderas pequeñas con presiones inferiores a 20 bar. Las acuotubulares son aquellas en las que el agua circula por el interior de los tubos, son las mas comunes. Aparte de estos criterios de clasificación, existen otros que hacen innumerables las clases de calderas actualmente existentes.

2.2. - Síntesis de redes de Intercambiadores de calor:

El problema de la síntesis de redes de Intercambiadores de calor puede ser definido como la determinación de los parámetros operacionales versus la eficiencia de la red para intercambiar por medio de un conjunto de corrientes (calientes o frías) del proceso. En donde cualquier necesidad de calentamiento o enfriamiento no satisfecho por el intercambio entre las corrientes debe ser provisto por utilidades externas, por ejemplo: vapor, aceite caliente, agua de refrigeración y refrigerantes.

Para sintetizar todo esto como una red debe estar disponible la siguiente información

1. El conjunto de corrientes calientes a ser enfriadas y el conjunto de corrientes frías a ser calentadas.
2. Temperaturas de entrada y de salida de todas las corrientes
3. Poder calorífico (Cp) y coeficiente de transferencia (h) de estas corrientes, con sus dependencias en temperatura.
4. Caídas de presión disponible para las corrientes

La tecnología Pinch es una de las herramientas para resolver el problema.

Esta reconoce la necesidad de fijarse un objetivo, prediciendo cual es el mejor comportamiento que posiblemente puede ser alcanzado por el proceso.

2.3. - Tecnología Pinch:

En el año de 1978 comienzan a aparecer los primeros estudios sobre esta tecnología, pero es solo desde hace algunos años que comienza a aplicarse, teniendo gran aceptación, gracias a los resultados alcanzados, en plantas petroquímicas, químicas, de alimento y papel.

La tecnología Pinch tiene como objetivo fundamental optimizar los procesos en donde ocurra transferencia de calor, puede ser aplicada tanto en la fase de diseño como en plantas ya operativas.

Para lograr sus objetivos, la tecnología se basa en la generación de unas curvas de Temperatura vs. Calor, características del sistema, en las cuales se representan las corrientes frías y calientes que entran al sistema. En estas curvas se puede apreciar un ΔT entre las corrientes calientes y frías, este ΔT es el factor a optimizar por la tecnología, la cual pregona que existe un valor optimo para cada sistema, la optimización se logra mediante la manipulación de las denominadas corrientes de servicio, que no son mas que los aportes energéticos que se hacen al sistema, como por ejemplo vapor vivo, agua de refrigeración entre otras.

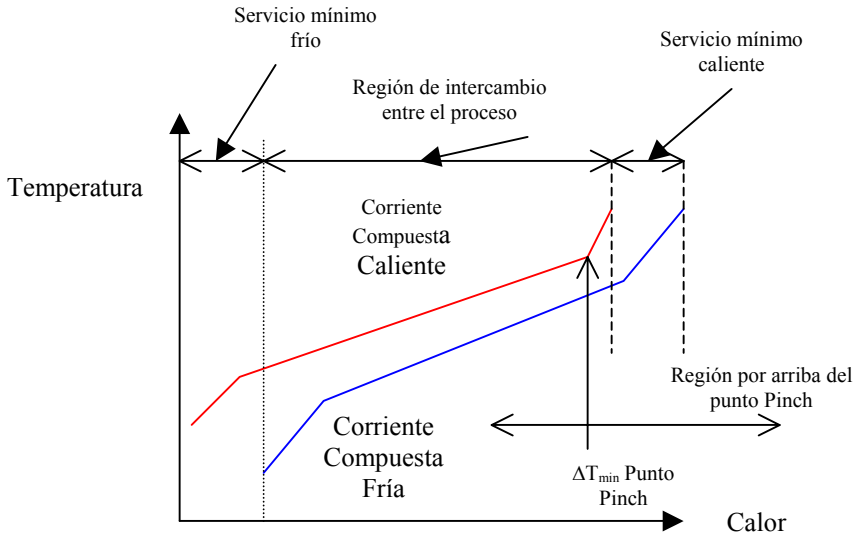


Figura 11 Curvas compuestas de un sistema de cuatro corrientes

Para la generación de las curvas T vs. Q también conocidas como curvas compuestas del sistema es necesario seguir una serie de pasos que serán descritos a continuación.

Diagrama de mallas del sistema: Es una representación gráfica en la cual se incluyen todas las corrientes del sistema (frías y calientes), se entiende por corrientes del sistema a todas aquellas líneas de flujo en las cuales y sin importar la causa exista al menos un ΔT

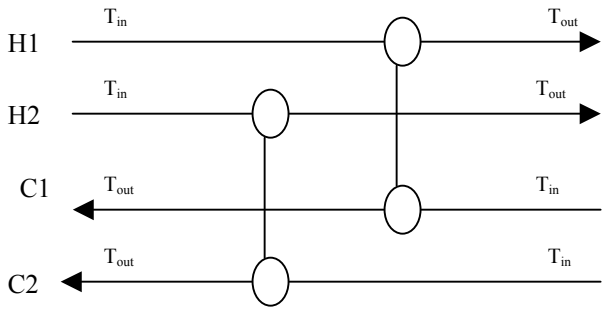


Figura 12 Diagrama de mallas de un sistema de cuatro corrientes. Los círculos representan los Intercambiadores de calor

En el diagrama de mallas es necesario incluir las temperaturas de entrada y salida sobre cada corriente, además de las variaciones que puedan ocasionar elementos como Evaporadores, calentadores, condensadores etc.

Tabla – Algoritmo del sistema: En esta lo que se hace es incluir en una tabla las temperaturas del sistema de manera descendiente, sumando en el caso de las corrientes frías y restando en el caso de las corrientes calientes el valor $\Delta T_{min}/2$. Todo esto se hace con la finalidad de dividir el sistema en intervalos de temperatura, es importante aclarar que las temperaturas que se repitan no se incluyen en la tabla.

Una vez dividido en intervalos el sistema, se procede a determinar e incluir en la tabla los valores del producto $(\Sigma WC_p)_{Neto}$ de cada intervalo, tomando en consideración que corrientes se encuentran presentes en cada uno de ellos

$$(\Sigma WC_p)_{Neto} = (\Sigma WC_p)_{c.frias} - (\Sigma WC_p)_{c.calientes} \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Con el producto del $(\Sigma WC_p)_{Neto}$ y la diferencia de temperaturas del intervalo correspondiente es posible determinar el calor neto de cada intervalo, lógicamente que los valores de Q_{Neto} positivos implican un déficit de calor en el sistema, mientras que los valores de Q_{Neto} negativos indican un exceso de calor para el intervalo.

Partiendo de cero y restándole a este el valor del calor neto de cada intervalo es posible hacer un balance en el cual se transfiere calor de los intervalos de mayor temperatura a los de menor temperatura, este balance da como resultado un calor que es conocido como $Q_{cascada}$

$$Q_{cascada\ i} = Q_{cascada\ i-1} - Q_{int,\ i} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

El $Q_{cascada}$ lo que en esencia representa es la síntesis de redes de Intercambiadores de calor.

El $Q_{cascada}$ debe ser revisado para determinar la existencia de algún valor negativo, ya que este representaría una transferencia de calor negativa, lo cual es termodinámicamente in factible, esta transferencia negativa es ocasionada por la insuficiencia de calor en algunos intervalos superiores, los cuales no son capaces de satisfacer los requerimientos de los intervalos inferiores, esta condición puede ser corregida suministrando al sistema por medio de corrientes externas la cantidad de calor indicada por el valor más negativo de $Q_{cascada}$, bajo este criterio, y basados en la teoría del $Q_{cascada}$ se define el valor $Q_{R,cascada}$

$$Q_{R,cascada,\ i} = (\text{valor más negativo de } Q_{cascada}) - Q_{int,\ i} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Una vez completada la columna correspondiente al $Q_{R,cascada}$ se toman los valores de la primera y la ultima fila que corresponden a las mínimas utilidades calientes y frías requeridas por el sistema, adicionalmente, el o los puntos donde $Q_{R,cascada}$ se hace cero indica la o las temperaturas Pinch

Intervalo	H1	H2	C3	C4	$T_{intervalo}$	$WC_{p\ intervalo}$	$Q_{intervalo}$	$Q_{cascada}$	$Q_{R,\ cascada}$
1					T_1			0	$-Q_{casc,\ min}$
						$WC_{p\ 1}$	Q_1		
2					T_2			$Q_{cascada,\ 1}$	$Q_{R,\ cascad\ 1}$
						$WC_{p\ 2}$	Q_2		
3					T_3			$Q_{cascada,\ 2}$	$Q_{R,\ cascad\ 2}$

Tabla 2 Tabla - Algoritmo de un sistema de cuatro corrientes

Es importante destacar que este procedimiento es muy utilizado en fases de diseño, donde se hacen pruebas para determinar cual es el ΔT_{min} mas apropiado para el sistema, sin embargo cuando esta metodología se aplica aplantas ya operativas lo primero que se hace es determinar el ΔT del sistema, para después hacer pruebas y determinar cual es el ΔT_{min} que se puede aplicar al sistema.

La temperatura pinch es crucial para la síntesis en redes de intercambiadores de calor, ya que a partir de ella y basada en la segunda ley de la termodinámica es que la tecnología pinch propone sus tres postulados principales

1. No debe ocurrir transferencia de calor a través del punto pinch
2. No deben existir corrientes externas frías por arriba del punto pinch

3. No deben existir corrientes externas calientes por debajo del punto pinch

Para visualizar gráficamente estas condiciones operacionales se utiliza como herramienta otra curva llamada gran curva compuesta, que a diferencia de las antes mencionadas curvas compuestas representa como al sistema como un elemento único.

Esta curva se construye graficando la columna correspondiente a la $T_{intervalo}$ contra la columna del $Q_{r,\ cascada}$

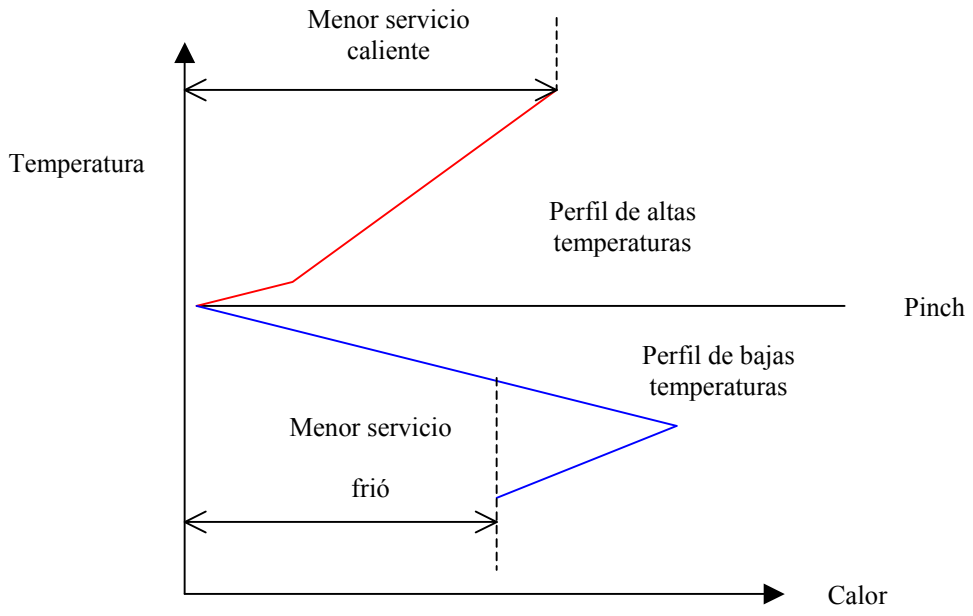


Figura 13 Gran curva compuesta para un sistema de cuatro corrientes

2.4. - Incertidumbre (Distribuciones Probabilisticas):

La incertidumbre es una medida de la inseguridad o grado de desconocimiento acerca de una variable o evento.

Los modelos mas conocidos para cuantificar la incertidumbre asociada a una variable son las distribuciones probabilisticas, considerando para ello todos los posibles valores que dicha variable puede tomar.

Si las variables de entrada del proceso tienen incertidumbre, entonces los resultados o salidas del modelo deben arrastrarla y el estudio de su propagación es el procedimiento que permite incluirla dentro del análisis. Tal propagación se sustenta en técnicas de simulación, como Monte Carlo, utilizada para la aplicación de ésta metodología.

3.1.- Caracterización preliminar:

Debido a lo complejo del sistema, y lo poco común de este, fue importante establecer claramente cuales son los elementos que intervienen y sus características mas relevantes.

3.1.1. - Licor negro:

Análisis elemental: Es una característica fundamental en el trabajo, ya que su influencia en la determinación de la eficiencia de la caldera es bien representativa. Con este se busca determinar el contenido de Carbón, Hidrógeno, Oxigeno, Sodio, Potasio, Azufre, Cloro e inertes. En la planta no se hace este tipo de análisis, por lo que fue necesario hacerlo fuera de ella. Este análisis debe ser realizado bajo la norma T625 propuesta por TAPPI.

Contenido de sólidos: También es un factor de gran importancia para el trabajo. Se Determinó siguiendo el procedimiento de operación Lab Wave 9000. El equipo empleado fue una Balanza Microondas (Fig. 14) la cual reporta directamente el porcentaje de sólidos.



Figura 14 Balanza Microondas

Poder calorífico: Se determinó en el licor cuando entra y sale a evaporadores, usando una Bomba Calorimétrica Adiabática (Fig 15), con atmósfera de oxigeno, según la norma TAPPI T684. En cuanto al poder calorífico del licor en los diferentes efectos del Set de evaporadores, este se determino con la utilización de una curva propuesta por Masse et. al. La cual presenta el poder calorífico del licor en función de su concentración.



Figura 15 Bomba Calorimétrica Adiabática

3.1.2. - Set de Evaporadores:

Para poder definir cuales son las condiciones de operación más relevantes del Set, se hizo un estudio detallado de todos los componentes del mismo, en donde se incluyeron los elementos que lo componen, cual es su función dentro del sistema, como se clasifican, en donde se intercambia mayor cantidad de energía y en que forma, y finalmente como van interactuando cada uno de los elementos.

3.1.3. - Caldera de recuperación:

Aun cuando el estudio no se realizó sobre la caldera específicamente, se le hizo un tratamiento similar al de Evaporadores, solo que en ella solo se identificaron sus características más relevantes para clasificarla, y así poder la enmarcar correctamente dentro del trabajo.

3.2. - Estudio Probabilístico:

Se desarrollo con la utilización de un software que aplica técnicas de simulación de Monte Carlo, y se aplico a todas las variables del Set de Evaporadores, flujo másico, temperatura, concentración etc. Este estudio se realizó entre los meses de Noviembre de 2002 y Enero de 2003.

3.3. - Generación de los sub programas:

Todos los sub programas fueron desarrollados en lenguaje C^{++} por la gran capacidad y herramientas que este posee para la programación dirigida a objetos.

3.3.1. - Caldera de recuperación:

Debido a la complejidad de esta unidad, y a la gran cantidad de normas de seguridad que en esta intervienen, se utilizó para la generación del sub programa, una hoja de calculo propuesta por TAPPI, la cual determina por medio de un balance general de masa y energía la eficiencia en la conversión térmica, es decir el aumento en la producción de vapor en función a la energía consumida.

Evidentemente el balance de masa y energía está ya realizado en la hoja de calculo, por lo que para su ejecución solo fue necesario ingresar el porcentaje de sólidos a la

entrada, el análisis elemental del licor, el poder calorífico del licor, Adicionalmente, en ella se realizaron las siguientes mediciones:

Análisis del fundido que sale de la caldera: Se basa en determino la concentración de sulfitos y sulfatos del fundido, además de la cantidad de carbón no quemado, todo este análisis se realiza en el laboratorio de la URQ.

Características del aire para la combustión y los gases de escape: Fue determinada la temperatura del aire que entra en la caldera, mientras que a los gases de escape se les determino la cantidad de O_2, CO, SO_2, justo en el Economizador, con la utilización de un analizador de gases de combustión marca Bacharach, modelo 300. También se determino la temperatura de los gases de escape justo a la salida de la ultima etapa del Economizador.

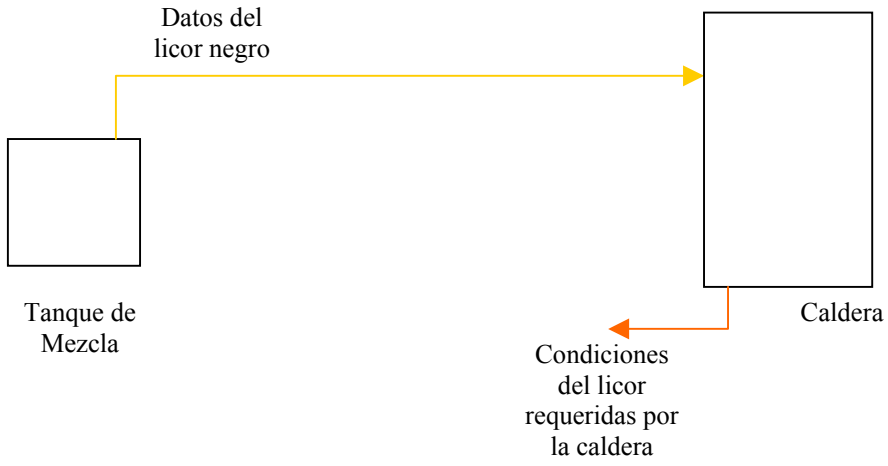


Figura 16 Sub programa caldera

3.3.2. - Set de Evaporadores:

Para desarrollarlo, se realizo un balance de masa y energía a todo el Set, en donde quedaron plasmados todos los flujos másicos del licor, vapor, condensados y gases no

condensables, así como sus correspondientes temperaturas y concentración de sólidos (para el caso del licor).

De este balance se extrajeron un gran número de ecuaciones, las cuales fueron agrupadas y reorganizadas de forma tal que se genero un sistema lineal de tipo

$$Ax = b \qquad \text{(Ecuación 18)}$$

Donde "A" es una matriz cuadrada (38 × 38), "x" es un vector columna de 38 términos compuesto por todos los flujos másicos del sistema, y "b" es otro vector columna también de 38 términos llamado vector solución.

Este sistema se resolvió aplicando el método de Gauss – Jordan, adicionalmente se genero una función objetivo, en este cazo formada por los flujos másicos de los vapores de 50 y 150 psi, la cual debe ser optimizada (minimizada).

El problema más significativo en términos de la programación fue, que en el sistema de la Ecuación 18 la matriz "A" varia según la combinación de temperaturas de las corrientes de vapor y licor, para generar todas las combinaciones posibles en el sistema, fue necesario generar una serie de funciones recursivas, que identifican la combinación y estudia su factibilidad, de ser factible genera la matriz "A" y resuelve el sistema.

Esta situación se repite hasta que prueba todas las posibilidades combinaciones de temperatura, y se queda con la que degenere en un menor valor de la función objetivo.

El balance de masa y energía se alimenta únicamente con las condiciones del licor a la entrada de la caldera, las cuales son calculadas por el sub programa de la caldera.

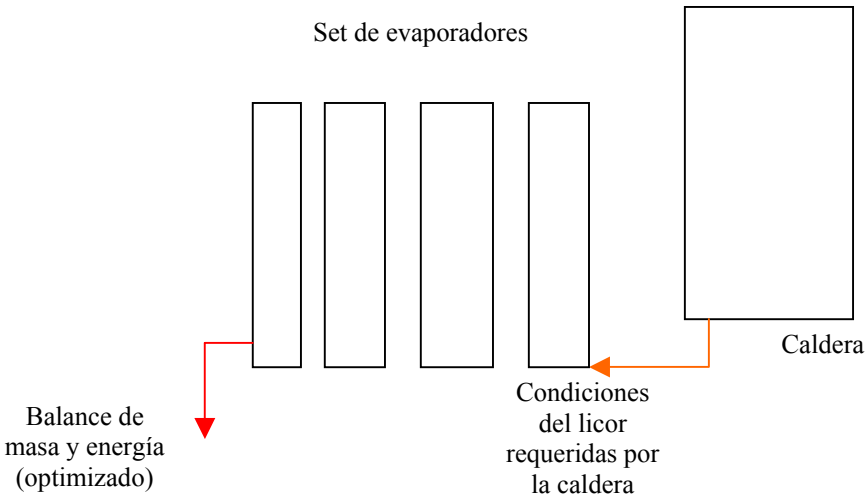


Figura 17 Sub programa Evaporadores

3.3.3. - Síntesis de Intercambiadores de calor (tecnología Pinch):

Para integrar en un algoritmo todo el proceso de síntesis en Intercambiadores de calor se utilizo el procedimiento propuesto por la tecnología Pinch:

Determinación del diagrama de mallas del sistema: Este se hizo considerando como corrientes calientes las de vapor y como corrientes frías las de licor, la única exclusión que se hizo en el sistema fue la del flash tank, el cual no se incluyo por que las entradas de calor se encuentran entre el primero y segundo efecto, mientras que el Flash Tank esta después del primer efecto, por lo que este no es relevante en cuanto al intercambio de energía entre las corrientes.

Tabla – Algoritmo del sistema: En esta se incluyeron todas las temperaturas de entrada y salida de las corrientes frías y calientes, con el ΔT_{min} del sistema que fue determinado experimentalmente haciendo una serie de corridas del simulador con datos reales. Con los valores obtenidos en esta tabla se construyeron para cada simulación las "gran curva compuesta" del sistema.

Tabla de las curvas compuestas calientes y frías: Contiene, por separado, todas las temperaturas de entrada y salida de las corrientes frías y calientes, los valores arrojados por estas tablas permitieron construir las curvas compuestas (frías y calientes) del sistema para cada simulación.

El sub. programa de la síntesis de Intercambiadores de calor funciona con los valores de flujo másico y temperatura de las corrientes frías y calientes, que son suministradas por el sub. programa de Evaporadores, los cuales se encarga de optimizar.

Optimización del ΔT_{min} del sistema: Se llevo a cabo cambiando el $\Delta T_{sistema}$ por un valor de ΔT_{min} para Set de intercambiadores de calor propuesto por Shenoy (1995).

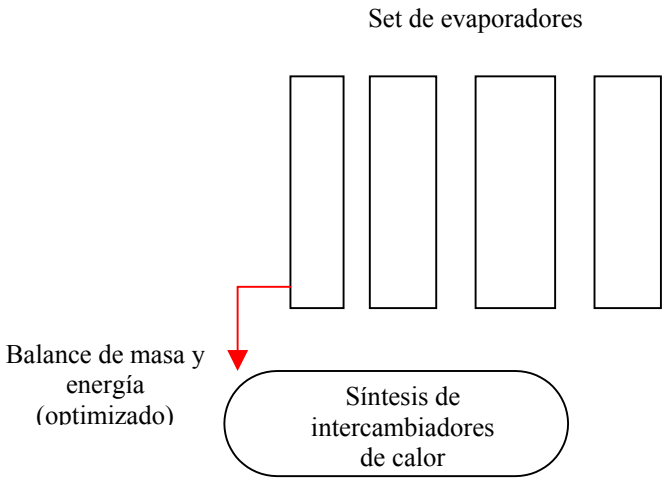


Figura 18 Sub programa de Pinch

3.4. - Generación del Simulador:

El simulador al igual que los sub programas que lo integran fue desarrollado en lenguaje C^{++} por la gran capacidad y herramientas que este posee para la programación dirigida a objetos.

Como se dijo anteriormente fue conformado por los tres sub programas ya descritos, para relacionar unos con otros se generaron una serie de interfaces que permiten el intercambio de información entre ellos, además de permitir el acceso a bases de datos comunes, sin embargo, no necesariamente este debe cumplir las tres etapas que lo conforman para funcionar, esta condición fue la que permitió hacer las corridas solo con las etapas dos y tres (Evaporadores y Pinch).

En la segunda etapa del simulador, se probaron todas las combinaciones posibles del sistema, aplicándoles las restricciones pre establecidas y finalmente tomando la combinación mas apropiada.

Para utilizar la tercera etapa del simulador, se varió el ΔT_{min} entre diez (según Shenoy 1995 este es un valor apropiado para redes de Evaporadores) y el ΔT_{min} propio del sistema, el cual se calculo con valores operacionales reales del Set (ΔT_{min} del sistema es 40º F).

Evidentemente a medida que el ΔT_{min} del sistema tiende a cero, el consumo de vapor será menor, mientras que a medida que este tiende a infinito su consumo será mayor por esto entre estos dos valores se realizaron las corridas, pero siempre tomando en cuenta la capacidades del sistema.

Por su parte la comunicación con el usuario se logro creando cuadros de dialogo bidireccionales en ambiente Windows, lo cual adicionalmente, facilita las funciones necesarias para que los sub. Programas funcionen correctamente, ya que, permiten que el usuario intervenga directamente en el proceso, reduciendo las funciones requeridas para su operación.

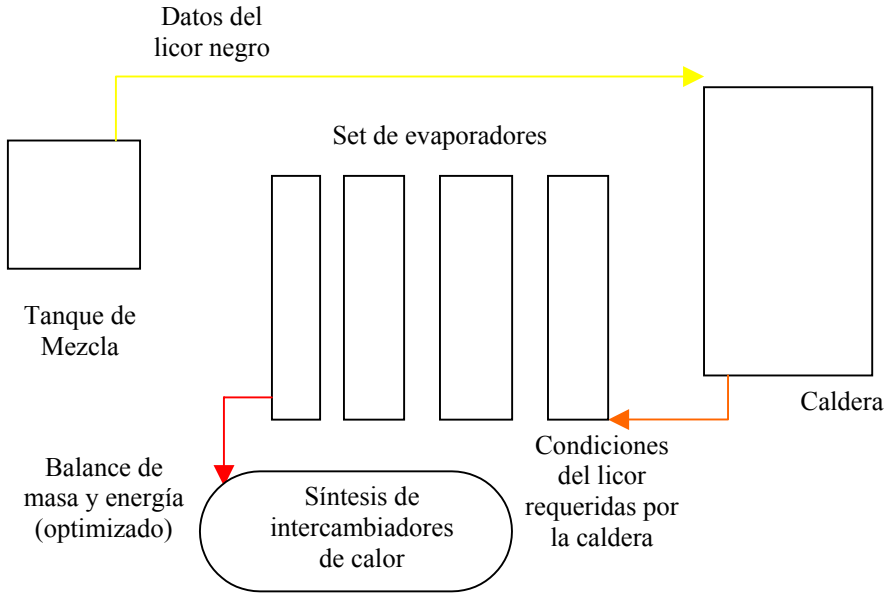


Figura 19 Diagrama de las etapas del simulador

3.5. - Corridas del simulador:

Fueron realizadas en la planta con el simulador ya funcionando en su totalidad, se llevaron a cabo con los mismos datos que se utilizaron para el estudio probabilístico, sin embargo y debido a los altos costos del análisis elemental del licor y el tiempo disponible, la etapa de la caldera (fase 1) del simulador, no se utilizo para predecir el funcionamiento del Set.

Se realizaron tres tipos de corridas distintas, las primeras con los valores de temperatura obtenidos en el levantamiento del sistema y el ΔT_{min} propio de este, esta primera simulación permitió determinar cuan próximos a la realidad son los valores obtenidos por el simulador, en otras palabras cuan eficiente es.

Las segundas simulaciones se realizaron con los mismos valores de temperatura obtenidos en el levantamiento del sistema pero con un ΔT_{min} igual a diez (según Shenoy 1995 este es un valor apropiado para redes de Evaporadores), con el cual se pudo establecer el poder de la tecnología Pinch en la síntesis de intercambiadores de calor.

La tercera se hizo con la rutina completa, es decir, en función de los valores de flujo másico a la salida del Set, una serie de sub. Rutinas determinaron las temperaturas mas apropiadas para lograr los parámetros establecidos de flujo másico y concentración. Con estas temperaturas y el ΔT_{min} igual a diez se determinó, al igual que en los casos anteriores, el consumo de vapor. Con esta ultima simulación se pudo cuantificar la capacidad de optimizar del conjunto tecnología Pinch – segunda etapa del simulador.

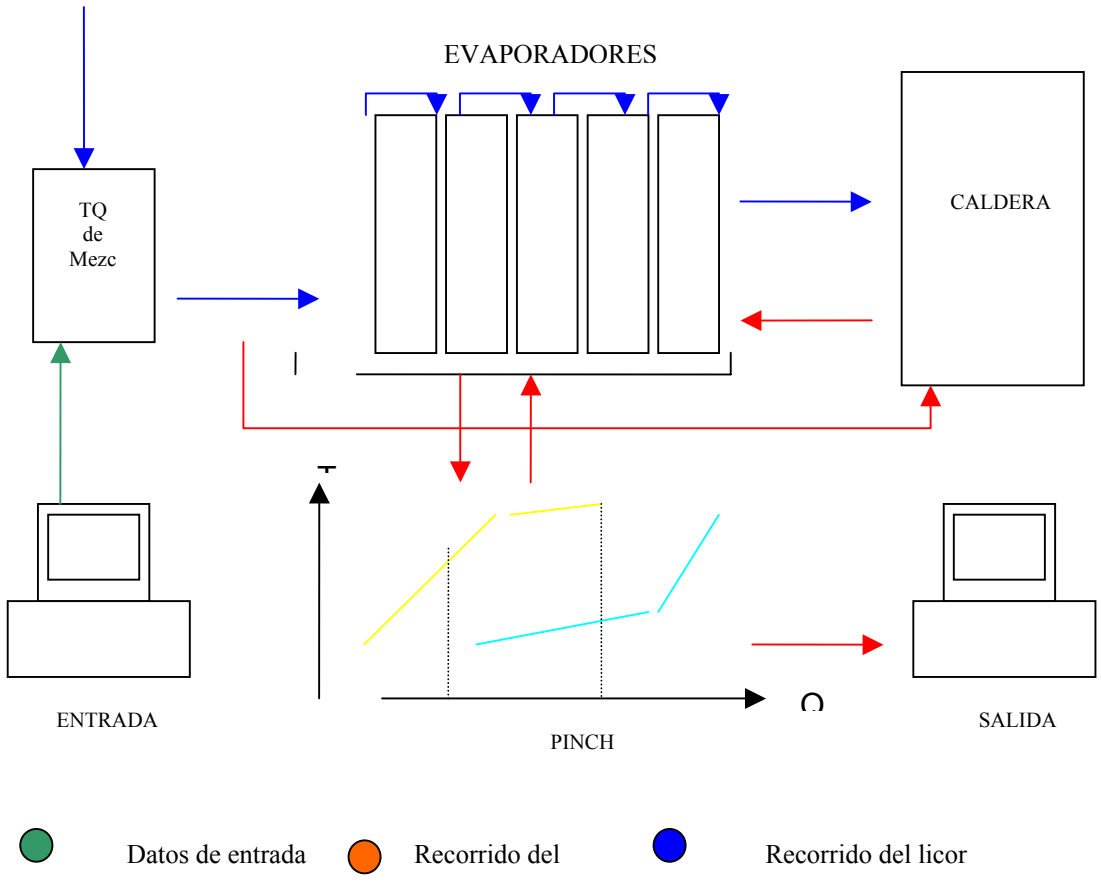


Figura 20 Diagrama del simulador y el licor en el sistema.

A los valores obtenidos durante las corridas se les aplico el mismo estudio probabilístico, para así poder ser consistente en la presentación de los resultados.

Adicionalmente con las corridas del simulador se determinaron, para cada una, las curvas compuestas del sistema y la gran curva compuesta del mismo.

4.1.- Caracterización preliminar

4.1.1. -Licor negro

Análisis elemental: Es un análisis en base seca, a partir del cual se establece la naturaleza elemental del licor negro, no obstante, en el presente estudio por razones de costo no fueron realizados estos análisis, sin embargo, para estos casos TAPPI propone la composición elemental típica del licor negro, a los fines de aportar los datos requeridos por el sub programa Caldera. A continuación se presenta la tabla 2, en la misma se presenta el análisis elemental del licor negro.

Tabla 2 Análisis elemental del licor negro

Elemento	% (en base masa)
Carbono (C)	39.0
Hidrógeno (H)	3.8
Oxígeno (O)	33.0
Sodio (Na)	18.6
Potasio (K)	1.2
Azufre (S)	3.6
Cloro (Cl)	0.6
Inertes	0.2

Contenido de sólidos: Los resultados de las mediciones llevadas a cabo en el laboratorio de la Unidad de Recuperación de Químicos, entre los meses de noviembre y febrero, para la determinación del contenido de sólidos fueron sometidos a un estudio probabilístico, debido al gran número de mediciones hechas. Por tratarse de una

caracterización preliminar sólo se presenta la concentración del licor que entra al Set de Evaporadores (cuarto efecto). Los datos correspondientes al resto de los elementos que integran el Set de Evaporadores se presentan en los anexos, mostrándose las concentraciones correspondientes a cada efecto.

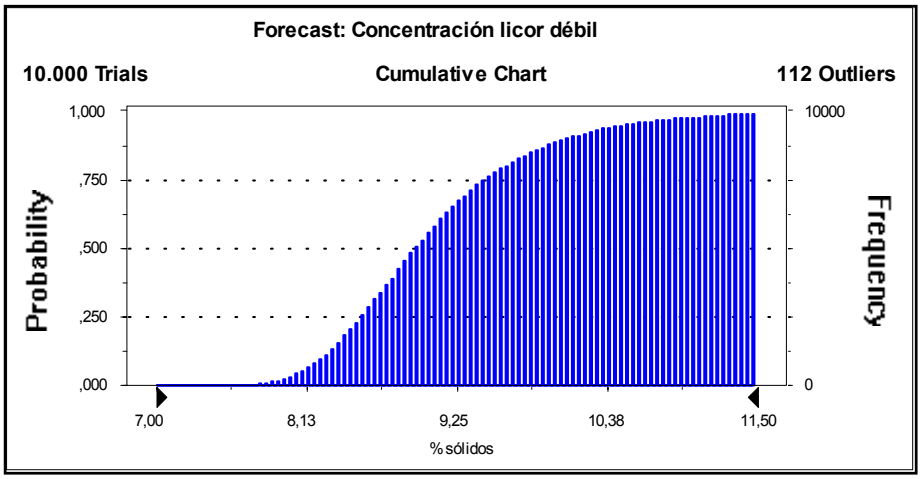


Figura 19 Concentración del licor débil (probabilidad vs. % de sólidos)

Tabla 3 Media y desviación estándar de la concentración del licor débil

Media	8,97%
Desviación estándar	0,77

Como se observa en la tabla 3, la media de la distribución de datos es de 8,97 % y su desviación estándar es 0,77. La media obtenida es baja en relación a los valores nominales de licor que entra al Set de Evaporadores cuyo valor oscila entre 10 y 10,5% de sólidos.

Poder calorífico

El poder calorífico del licor negro varía según el contenidos de sólidos característico, dicha variación ha sido estudiada con anterioridad por diversos autores encontrándose algunos modelos que sirven como funciones de extrapolación, a partir de las cuales es posible predecir el poder calorífico en función del contenido de sólidos. En la figura 20 se muestran los modelos propuestos por Masse et al, Harbin y Brown, así como también, los datos experimentales a partir de los cuales se establece la capacidad predicativa de ambos modelos. Ahora bien a efectos de nuestro estudio, el poder calorífico fue determinado utilizando el modelo de Masse y dichos resultados se presentan en la tabla 4 para cada efecto.

Tabla 4 Poder calorífico del licor negro en la salida de cada efecto

Efecto (salida)	Poder calorífico (kJ/kg^{o}C)
Flash Tank	3.1
Primer	3.2
Segundo	3.5
Tercero	3.7
Cuarto	4
Quinto	3.8

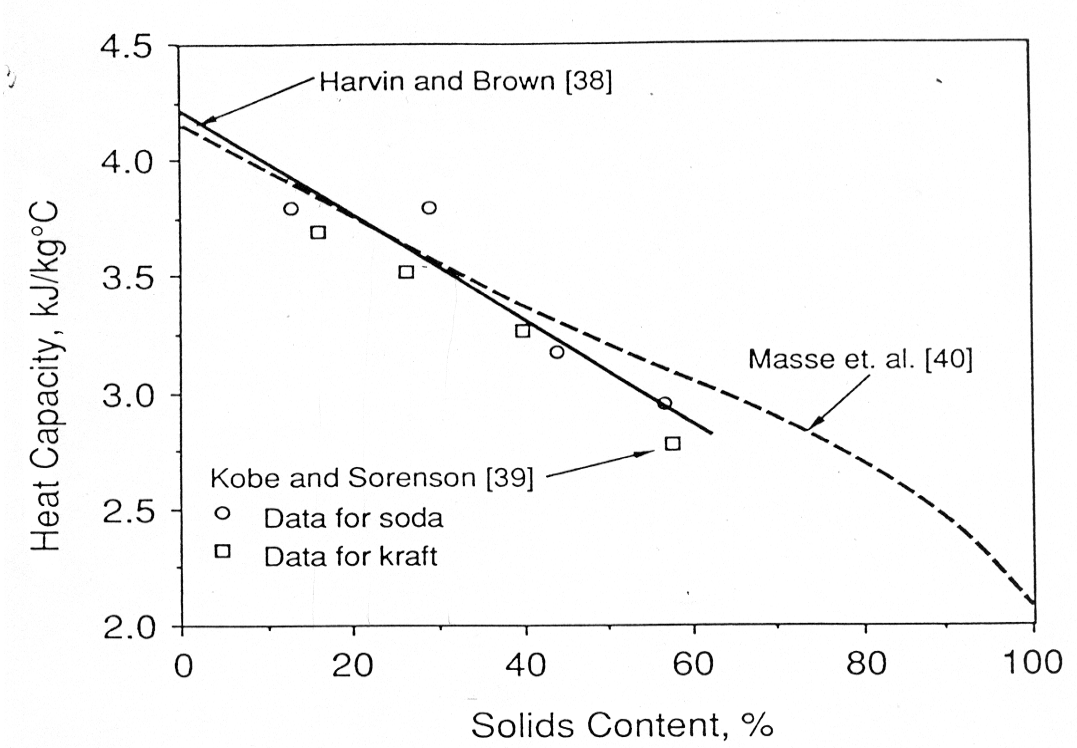


Figura 20 Poder calorífico del licor negro en función del contenido de sólidos

4.1.2. -Set de evaporadores:

El Set de evaporadores de Mocarpel es de tipo "Falling Film" o película descendente. Antes de alcanzar sus condiciones finales el licor atraviesa por cinco efectos diferentes, por lo que se dice que el Set es de múltiple efecto. Cada uno de estos efectos está formado por un intercambiador de calor de flujo cruzado, a excepción del primer efecto que está formado por tres de estos intercambiadores. Dos siempre están en servicio mientras al otro se le hace mantenimiento.

Cada etapa o efecto del Set de Evaporadores recibe el licor en la parte superior, en tal proporción que se forma un flujo anular, dejando un núcleo gaseoso que es ocupado por los componentes volátiles y el vapor de agua. El propósito de estos equipos es aumentar la concentración de sólidos en el licor mediante cinco fases (etapas o efectos) de

calentamiento, a través de las cuales se va reduciendo el contenido de agua por evaporación.

La energía de vaporización la aporta el vapor de agua proveniente de la caldera (solo en el primer efecto) y el vapor generado por la evaporación del agua del licor en los efectos restantes. Cabe destacar que la secuencia de calentamiento y evaporación del licor presenta un orden muy particular, el mismo es presentado en la tabla 5 .

Tabla 5 Secuencia de calentamiento del licor

Pasos del Licor	Efecto	Origen del vapor	Características del vapor
1	Cuarto	Tercer Efecto	saturado
2	Quinto	Cuarto Efecto	saturado
3	Tercero	Segundo Efecto	saturado
4	Segundo	Primer Efecto	saturado
5	Primero	Caldera	sobrecalentado
6	Flash Tank		

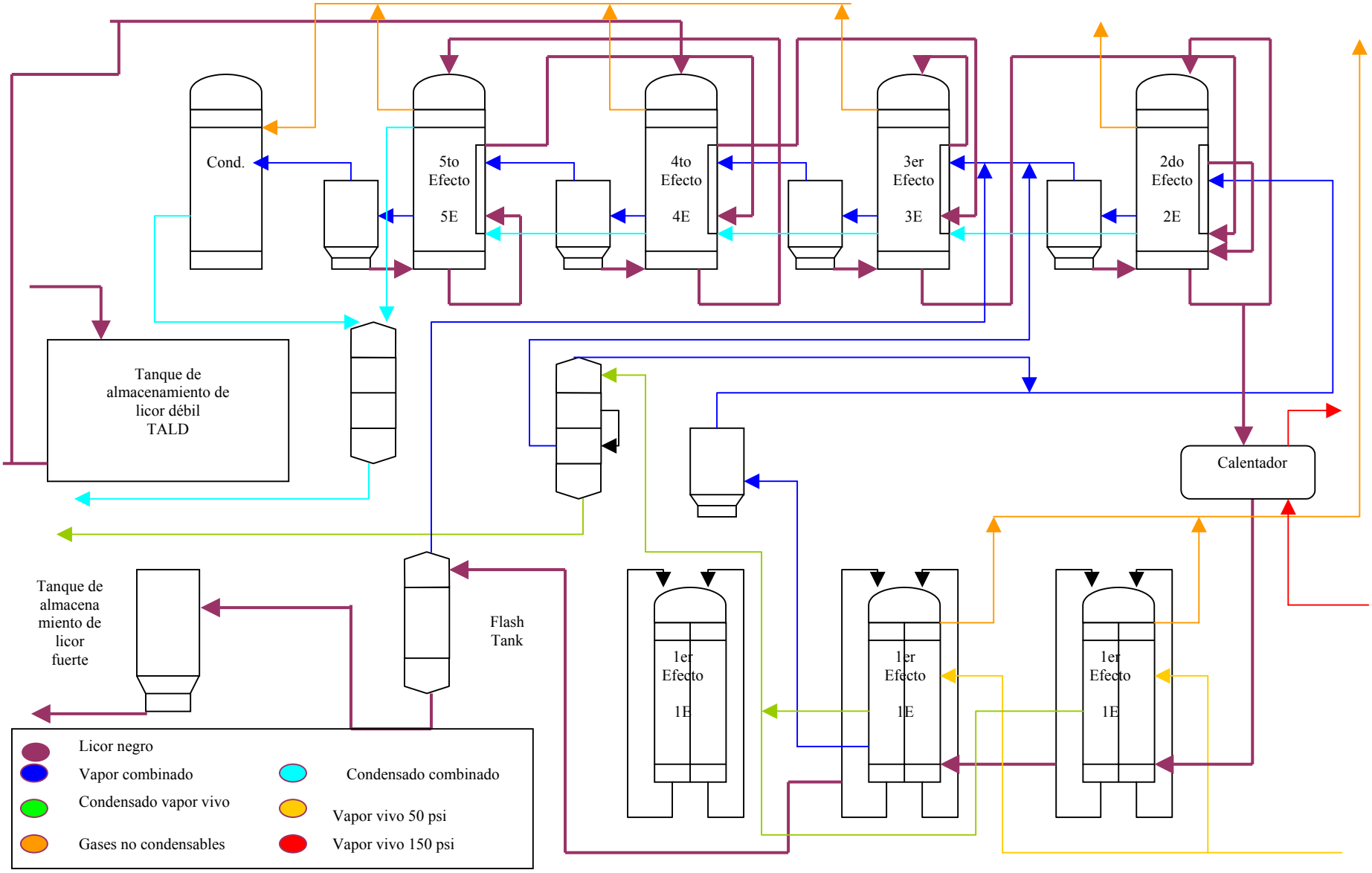
El quinto, cuarto, tercero y segundo efectos son llamados calentadores, ya que aunque evaporan una parte del licor en el cuerpo o carcaza, poseen un calentador que es donde ocurre la mayor transferencia de energía. Entre el segundo y el primer efecto está un calentador de superficie, alimentado con vapor de 150 psi, que aumenta la temperatura del licor en 20º F. Por su parte, el primer efecto es conocido como concentrador finidor, ya que la mayor parte de la energía que llega a éste es utilizada para evaporar y no para calentar.

El primer efecto es llamado así por ser el punto de alimentación de vapor vivo. Los restantes cuatro efectos se alimentan con el vapor generado en el efecto anterior. Para lograr esto a la salida de cada efecto hay un separador de vapor.

El segundo efecto utiliza recirculación parcial para alcanzar la temperatura adecuada, mientras que en el primer efecto cada cuerpo se divide en dos etapas con su propia recirculación.

El Set opera a bajas presiones (desde 2,44 psi en el quinto efecto hasta 17,53 psi en el primero). Éstas presiones se logran gracias a un condensador de superficie que recibe el vapor combinado que sale del quinto efecto y los gases no condensables, que son retirados de éste por un eyector de vacío.

El siguiente diagrama representa el set de evaporadores con todos los elementos que lo componen, y el recorrido de las corrientes que en él intervienen.



Ruta del licor negro: TALD – 4E – 5E – 3E – 2E – CALENTADOR – $1E_{1E}$ – $1E_{2E}$ *Ruta del vapor vivo 150 psi:* CALENTADOR *Ruta del vapor vivo 50 psi:* 1E

Ruta del vapor combinado: 2E - 3E - 4E – 5E - CONDENSADOR

4.1.3. -Caldera de recuperación

La caldera es una unidad Babcock & Wilcox, de tambor simple, de tipo acuotubular. Su función es dual: Por una parte genera vapor de proceso y por el otro emplea el licor fuerte (producto del Set de Evaporadores) como combustible.

En el hogar de la caldera, además de los humos se forma un fundido con altos contenidos de sustancias inorgánicas (químicos del proceso) los cuales son recuperados en etapas posteriores.

Las condiciones nominales de operación de la caldera son las siguientes:

- Flujo de vapor generado 77250 Lb/h
- Estado del vapor producido: 732 Psi 750 ºF
- Taza de licor quemado 51800 Lb/h, características del licor: 65 % de sólidos y 65/35 Organicos/Inorgánicos

En la figura 21 se aprecian los componentes de la unidad instalada en la empresa.

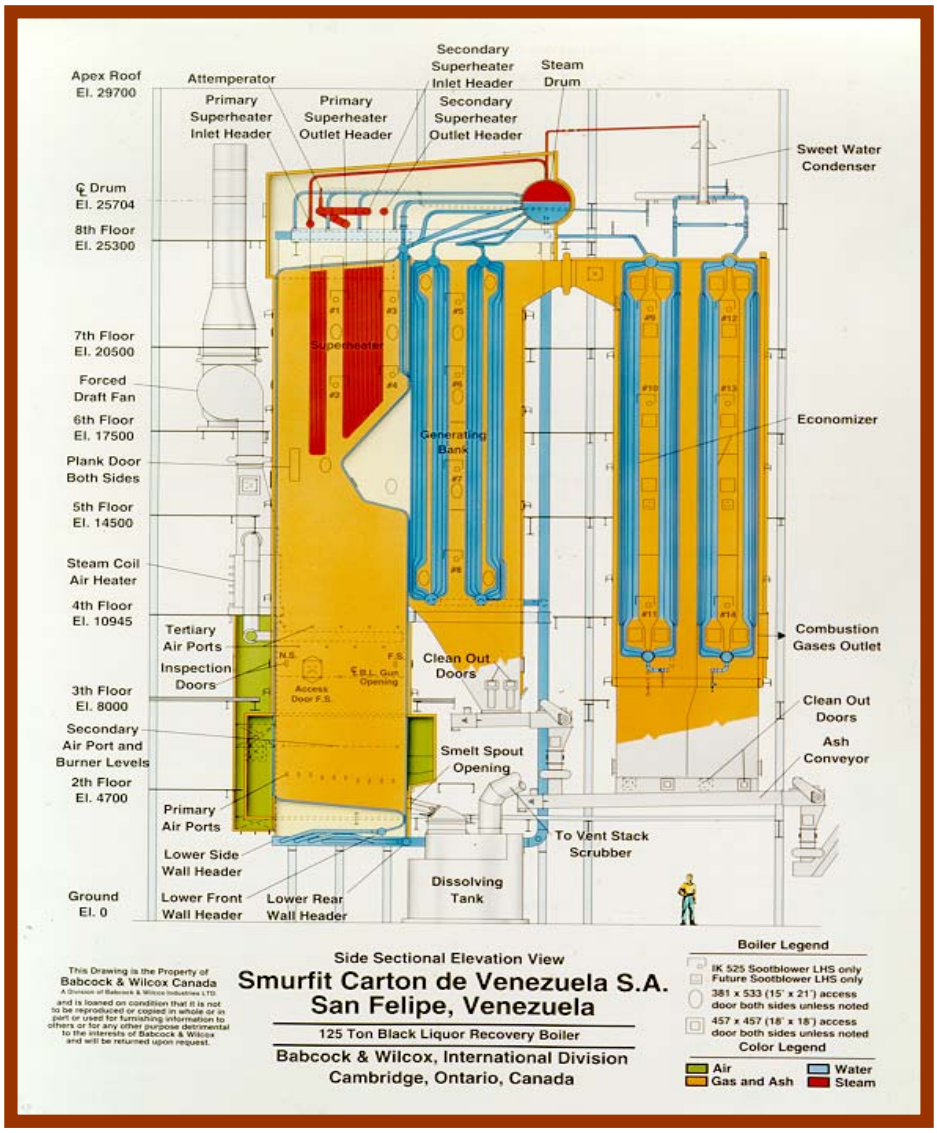


Figura 21 Caldera de recuperación de químicos de Mocarpel

4.2. - <u>Estudio probabilístico</u>

Por el tamaño de los reportes generados en el estudio, éste capitulo sólo hace referencia a las variables más importantes del estudio (vapor de 50 psi, sólidos a la entrada y a la salida del Set) el resto de las variables estudiadas son presentadas en el anexo 3..

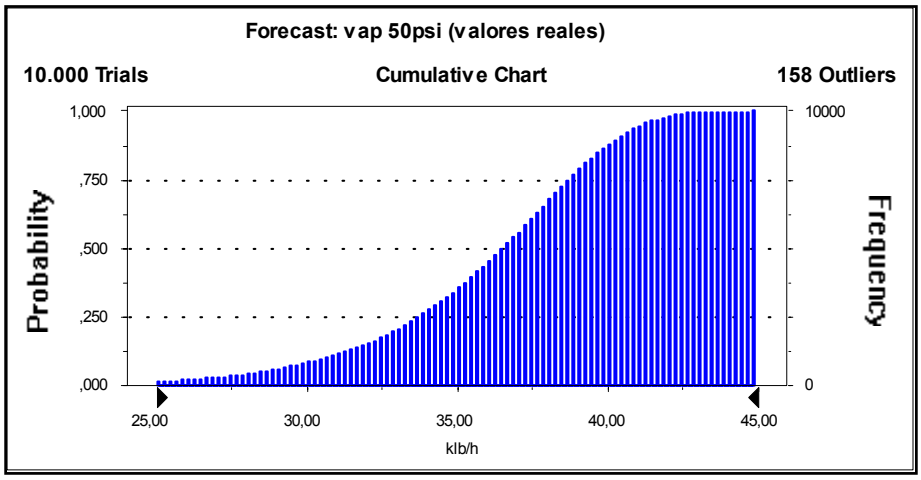


Figura 22 Consumo de vapor de 50 psi (klb/h Vs. Probabilidad)

Tabla 6 Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi

Media	36,62 klb/h
Desviación estándar	4,03

Como se aprecia en la tabla 6, la media de la distribución de datos es de 36,62 klb/h y su desviación estándar es 4,03. Estos valores están por debajo de los parámetros de operación que varían entre 45 y 46 klb/h.

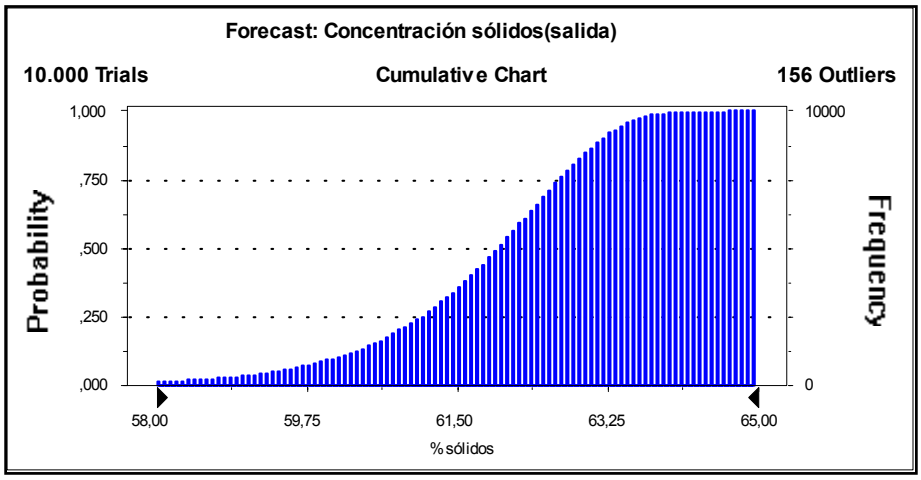


Figura 23 Porcentaje de sólidos a la salida del Set (% de sólidos vs. probabilidad)

Tabla 7 Media y desviación estándar de la concentración de licor a la salida del set

Media	62,02 %
Desviación estándar	1,33

En la tabla 7, la media de la distribución de datos es de 62,02 % de sólidos y su desviación estándar es 1,33. El valor de la media no coincide con su valor nominal de 65 %.

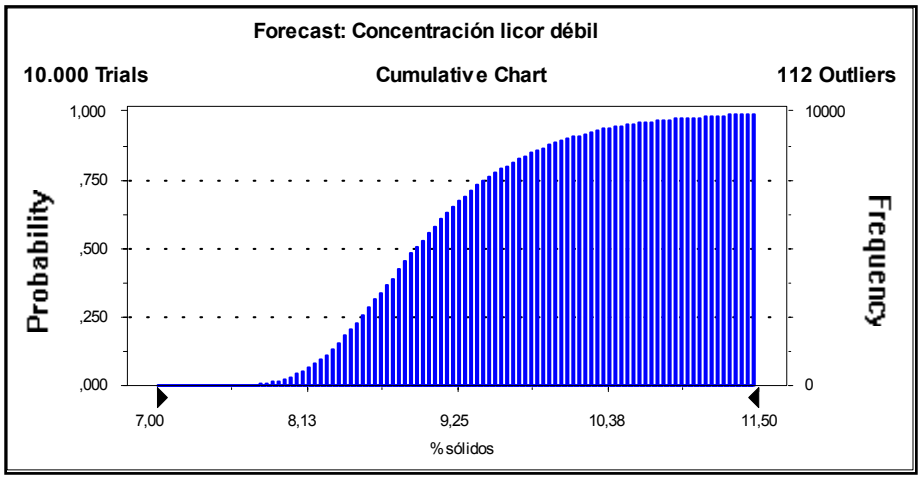


Figura 24 Porcentaje de sólidos a la entrada del Set (% de sólidos vs. probabilidad)

Tabla 8 Media y desviación estándar de la concentración de licor a la entrada del set

Media	8,97 %
Desviación estándar	0,77

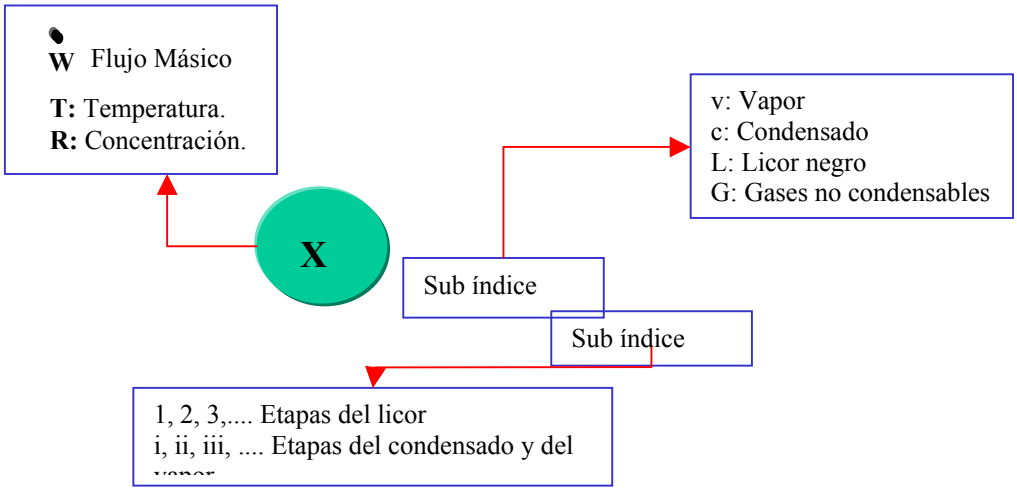
En la tabla 8, la media de la distribución de datos es de 8,97 % de sólidos y su desviación estándar es 0,77, este valor es bajo en relación a los valores nominales de licor que entra a evaporadores cuyo valor oscila entre 10 y 10,5% de sólidos.

4.3. – Generación de los sub programas

4.3.1. -Set de Evaporadores

Balance de masa y energía: Debido al gran número de ecuaciones que en el Set de Evaporadores se genera, únicamente se presenta el balance correspondiente al tercer efecto (los balances en los efectos 2, 3, 4, 5 son prácticamente iguales), primer efecto y Flash Tank.

En el balance, "W´" representa el flujo másico (lbs/h), "T" temperatura (ºF) y R la concentración de sólidos (% de sólidos). Mientras que cada uno de los subíndices representan lo siguiente: "v" vapor, "c" condensado, "L" licor negro y "G" gases no condensables, de acuerdo a la siguiente nomenclatura.

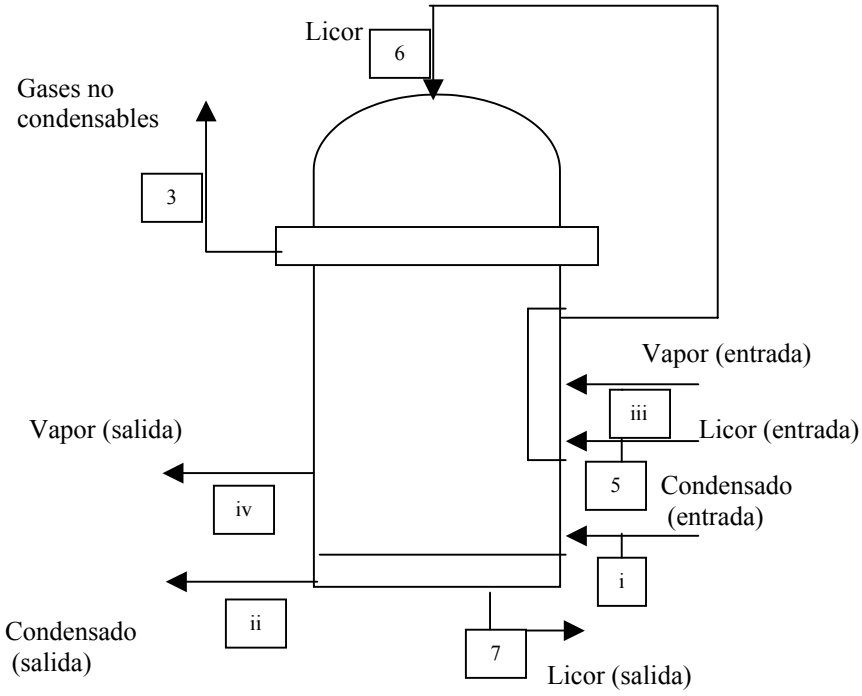


El primer efecto está compuesto por tres evaporadores, de los cuales dos siempre están en servicio mientras al otro se le hace mantenimiento. Cada uno de estos cuerpos está dividido en dos etapas con recirculación parcial. Este efecto fue analizado como un único

cuerpo, es decir, las cuatro fases que lo componen fueron consideradas como una sola, pero que realiza la misma función (concentrar el licor negro).

Los números que acompañan a los subíndices indican la etapa del sistema en la que se encuentra situado.

- Evaporador 3er Efecto:



- Balance de Masa:

$$\dot{W}_{L_5} + \dot{W}_{V_{iii}} + \dot{W}_{C_i} = \dot{W}_{G_3} + \dot{W}_{V_{iv}} + \dot{W}_{C_{ii}} + \dot{W}_{L_7}$$

$$\dot{W}_{L_6} \times R_6 = \dot{W}_{L_7} \times R_7$$

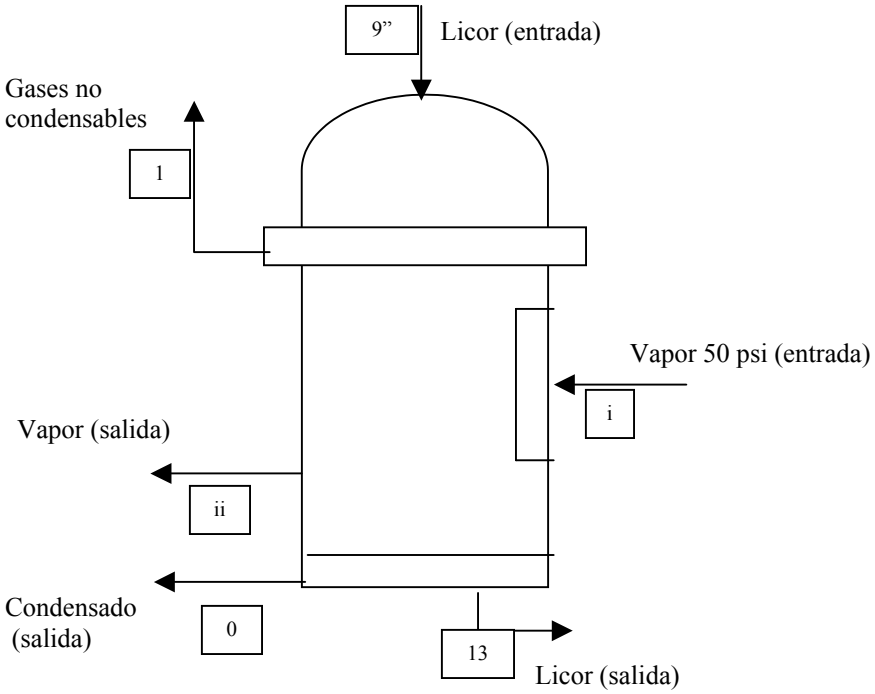
$$\dot{W}_{L_6} = \dot{W}_{L_5}$$

- Balance de Energía:

Pérdida del calor latente a la entrada del vapor en el recalentador + Pérdida del calor sensible a la entrada del licor en la carcaza+ Pérdida del calor sensible a la entrada del condensado en la carcaza = Ganancia del calor latente a la salida del vapor en la carcaza + Ganancia del calor sensible a la entrada del recalentador

$$\dot{W}_{V_{iii}} \times \Delta h_{V_{iii}} + \dot{W}_C \times C_p (T_{C_s} - T_{C_e}) + \dot{W}_{L_6} \times C_{p_l} (T_{l_6} - T_{L_7}) = \dot{W}_{V_{iv}} \times \Delta h_{V_{iv}} + \dot{W}_{L_5} \times C_{p_l} (T_{L_6} - T_{L_5})$$

- Evaporador 1er Efecto:



- Balance de Masa:

$$\dot{W}_{L_{9'}} + \dot{W}_{V_i} = \dot{W}_{G_1} + \dot{W}_{V_{ii}} + \dot{W}_{C_0} + \dot{W}_{L_{13}}$$

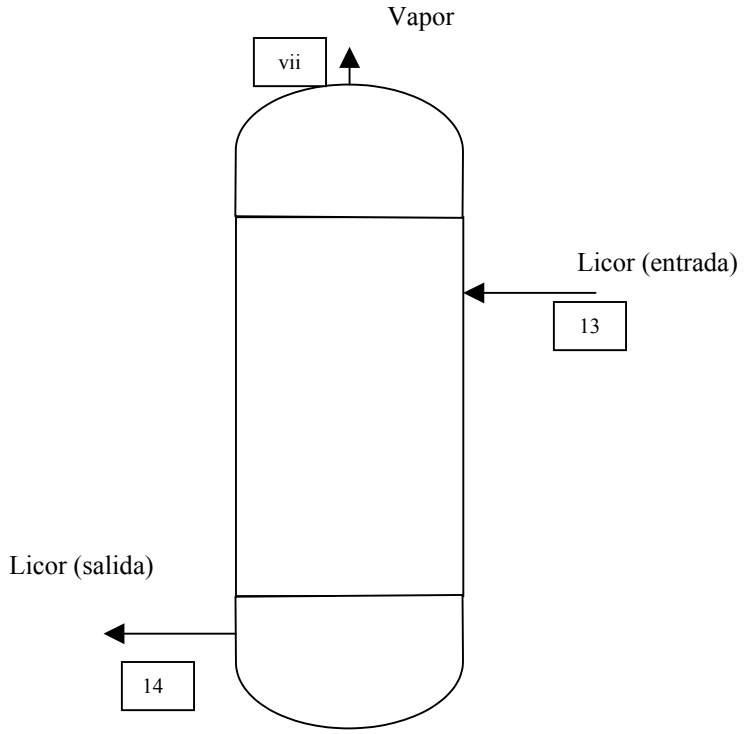
$$\dot{W}_{L_9} \times R_9 = \dot{W}_{L_{13}} \times R_{13}$$

- Balance de Energía:

Pérdidas de calor latente a la entrada de los concentradores = Ganancia de calor sensible a la salida del licor de los concentradores.

$$\dot{W}_{V_i} \times \Delta h_{V_i} = \dot{W}_{L_{13}} \times C_{p_l} (T_{L_{13}} - T_{L_{9''}})$$

- Flash Tank:



- Balance de Masa:

$$\dot{W}_{L_{13}} = \dot{W}_{L_{14}} + \dot{W}_{V_{vii}}$$

- Balance de Energía:

Pérdida del calor sensible a la entrada del licor en el tanque = Ganancia de calor latente en el vapor

$$\dot{W}_{L_{13}} \times Cp_L (T_{13} - T_{14}) = \dot{W}_{V_{vii}} \times \Delta h_{V_{vii}}$$

Las ecuaciones antes mostradas, junto con las correspondientes al balance de los demás cuerpos, fueron organizadas para formar el sistema

$$\mathbf{Ax = b}$$

Con esto se logró determinar para cada valor de A, los valore de flujo másico que conforman el vector "x", aplicando Gauss – Jordan.

4.3.2. -Síntesis de Intercambiadores de calor (tecnología Pinch)

Diagrama de mallas del sistema: En la figura 25 se aprecian todas las corrientes frías (F1, F2, F3, F4) y calientes (C1), con sus respectivas temperaturas de entrada y de salida del Set. Los círculos representan los intercambiadores (efectos), por lo que se encuentran unidos por una línea con su pareja para representar el intercambio que ocurre a través de ellos por las corrientes. Por su parte, el primer efecto se representa sin pareja, ya que su intercambio ocurre directamente con el vapor vivo de 50 psi, que es considerado un servicio externo y no una corriente interna del sistema.

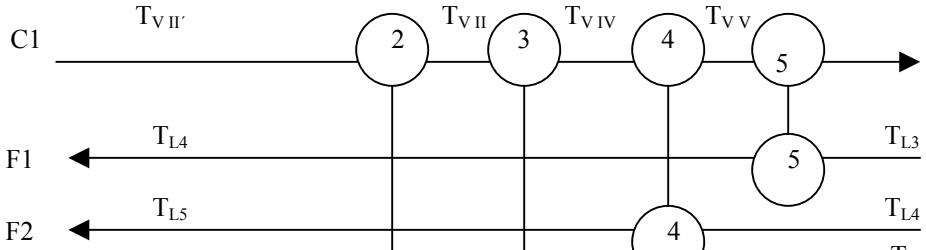


Tabla – Algoritmo del sistema: En la tabla número nueve se aprecia cómo se divide el sistema en intervalos, según la corriente que intervenga en éste, una vez dividido en intervalos, el algoritmo "equilibra" el sistema transfiriendo de las zonas de mayor temperatura a las zonas de menor temperatura.

Tabla 9 Tabla – Algoritmo del sistema

							A	B	C	D	E
intervalo		h1	c1	c2	c3	c4	$T_{intervalo}$	$WCp_{intervalo}$	$Q_{intervalo}$	$Q_{cascada}$	$R_{cascada}$
	WCp						°F	Btu/H°F	Btu/H	Btu/H	Btu/H
							$T_{I13}+\Delta T/2$			0	-Qcascada
1								WCp intervalo	Qintervalo		
							$T_{V\ II} - \Delta T/2$			Qcascada	Rcascada
2								WCp intervalo	Qintervalo		
							$T_{I7}+\Delta T/2$			Qcascada	Rcascada
3								WCp intervalo	Qintervalo		
							$T_{I5}+\Delta T/2$			Qcascada	Rcascada
4								WCp intervalo	Qintervalo		
							$T_{I4}+\Delta T/2$			Qcascada	Rcascada
5								WCp intervalo	Qintervalo		
							$T_{I3}+\Delta T/2$			Qcascada	Rcascada
6								WCp intervalo	Qintervalo		
							$T_{V\ VI} - \Delta T/2$			Qcascada	Rcascada

Tabla de las curvas compuestas calientes y frías: La esencia de las tablas 10 y 11 es prácticamente la misma que la de la tabla 9, sólo que trata por separado las corrientes calientes y las corrientes frías. Éstas permiten construir las curvas compuestas calientes y frías del sistema.

Tabla 10 Tabla de las curvas compuestas calientes del sistema.

			A	B	C	D
intervalo		h1	Tcaliente	Sumatoria	Calor del intervalo	Calor acumulado
	WCp		°F	WCp	Qint,h	Qacum,h
			$T_{V\ VI}$			0
1				$WCp_{intervalo}$	Qint,h	
			$T_{V\ II^-}$			Qacum,h

Tabla 11 Tabla de las curvas compuestas frías del sistema

						A	B	C	D
Intervalo		c1	c2	c3	c4	Tfría	Sumatoria	Calor del intervalo	Calor acumulado
	WCp					°F	WCp	Qint,f	Qacum,f
						T_{L3}			Qacum,f
1							$WCp_{intervalo}$	Qint,f	
						T_{L4}			Qacum,f
2							$WCp_{intervalo}$	Qint,f	
						T_{L5}			Qacum,f
3							$WCp_{intervalo}$	Qint,f	
						T_{L7}			Qacum,f
4							$WCp_{intervalo}$	Qint,f	
						T_{L13}			Qacum,f

Optimización del ΔT_{min} del sistema: Una vez representadas las curvas compuestas del sistema se determinaron los vértices de éstas para generar la tabla del Pinch inicial.

Tabla 12 Tabla del Pinch inicial

Vértices	A	a	b	B	c	d	e
Q	Q_A	Q_a	Q_b	Q_B	Q_c	Q_d	Q_e
Tcaliente	Tv_{VI}	Tv_a	Tv_b	$Tv_{II'}$			
Tfria		T_{L3}	T_{L4}	T_{LB}	T_{L5}	T_{L7}	T_{L13}
ΔT		ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3			

La tabla 12 representa el Pinch inicial. En ésta, las temperaturas y los calores están al ΔT_{min} del sistema. Las celdas de la tabla que están resaltadas son las temperaturas de los vértices. Pero en la curva a la cual ellos no pertenecen, éstas temperaturas se determinaron por interpolación lineal.

En algunos casos, el calor correspondiente a las temperaturas que se encontraron por interpolación no correspondía con el valor que en su columna se indicaba. En estos casos el ΔT era un valor negativo, lo que implicaba la necesidad de desplazar la curva correspondiente al vértice estudiado para que los calores en cada vértice fueran los adecuados. Este desplazamiento viene dado en términos de calor, del cual se extraen los flujos másicos a modificar para alcanzar la optimización.

4.4. - Corridas del simulador

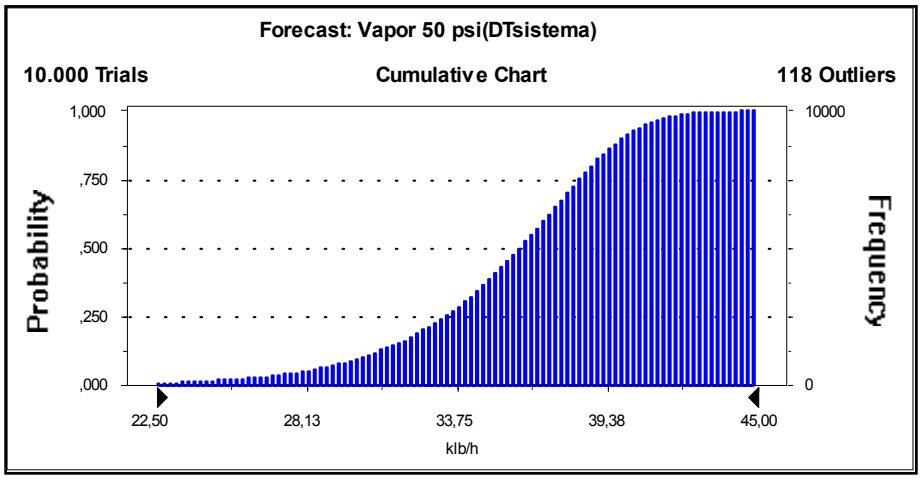


Figura 26 Consumo de vapor de 50 psi con el ΔT_{min} del sistema y con las temperaturas existentes en el sistema

Tabla 13 Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi con el ΔT_{min} del sistema y con las temperaturas existentes en el sistema

	A	B
Media	36,23 klb/h	36,62 klb/h
Desviación estándar	4,17	4,03

La tabla 13 muestra cómo la media del sistema, estudiado para el ΔT_{min} igual a 40, es 36,23 klb/h (columna A), mientras que la media que resulta del levantamiento del sistema que se muestran en la columna B, es 36,62 klb/h. Esta diferencia representa el grado de error presente en los resultados del simulador, el cual es 1,1 %.

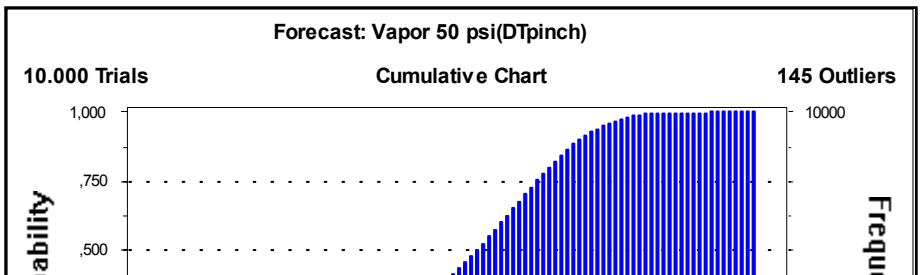


Figura 27 Consumo de vapor de 50 psi con el ΔT_{min} propuesto por la tecnología Pinch y con las temperaturas existentes en el sistema

Tabla 14 Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi con el ΔT_{min} propuesto por la tecnología Pinch y con las temperaturas existentes en el sistema

	A	B
Media	35,85 klb/h	36,62 klb/h
Desviación estándar	0,22	4,03

La tabla 14 muestra cómo la media del sistema, estudiado para el ΔT_{min} igual a 10, toma valores de 35,85 klb/h (columna A). Tal resultado implica una reducción del consumo de vapor de 50 psi por el orden de 0,8 klb/h, con respecto al consumo reflejado en el levantamiento del sistema (columna B). Esto representa un ahorro de hasta 2,2 % en el consumo de vapor de 50 psi.

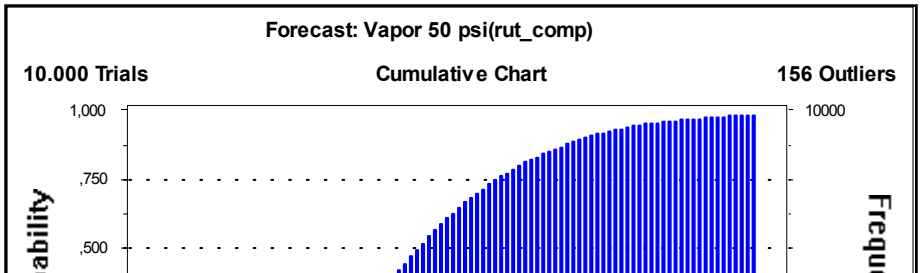


Figura 28 Consumo de vapor de 50 psi con el ΔT_{min} propuesto por la tecnología Pinch y las temperaturas seleccionadas por el simulador

Tabla 15 Media y desviación estándar del consumo de vapor de 50 psi con el ΔT_{min} propuesto por la tecnología Pinch y las temperaturas seleccionadas por el simulador

	A	B
Media	35,65 klb/h	36,62 klb/h
Desviación estándar	0,15	4,03

La tabla 15 muestra la media del sistema 35,65 klb/h (columna A), estudiado para el ΔT_{min} igual a 10 y las temperaturas seleccionadas por el propio simulador. Esto se puede traducir en una reducción del consumo de vapor de 50 psi de casi 1 klb/h, con respecto al consumo reflejado en el levantamiento del sistema (columna B). El ahorro en el consumo energético se encuentra alrededor del 2,7 %.

Para cada corrida se obtiene una curva compuesta del sistema y una gran curva compuesta, por lo que sólo se presentan unas de las más representativas de cada configuración.

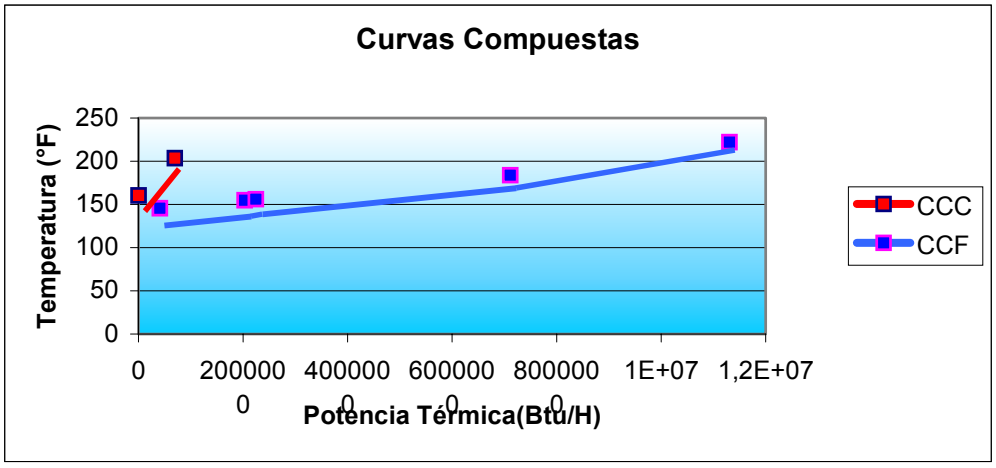


Figura 29 Curvas compuestas del sistema para una configuración de temperaturas dadas y ΔT_{min} propio del sistema

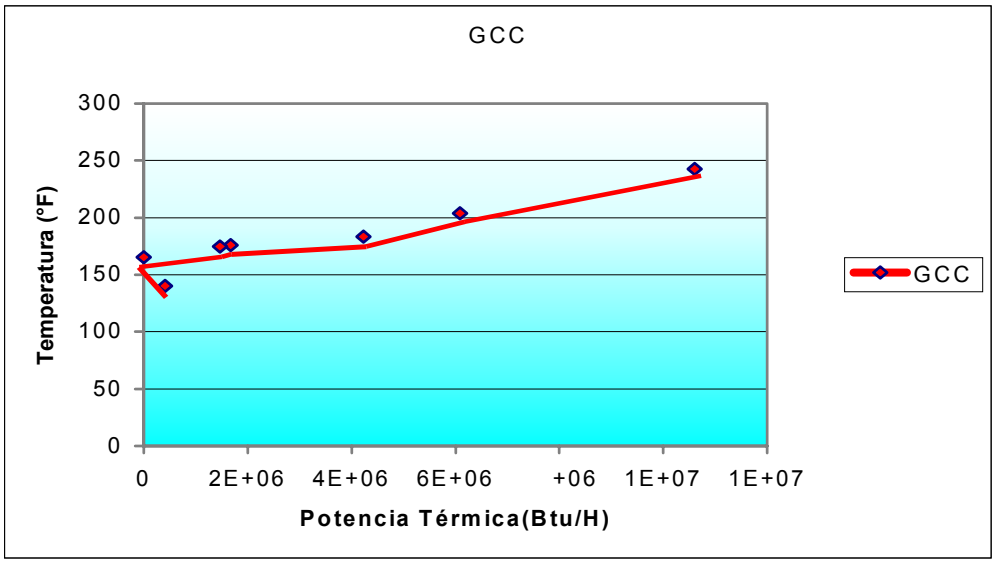


Figura 30 Gran Curva Compuesta del sistema para una configuración de temperaturas dada y ΔT_{min} propio del sistema

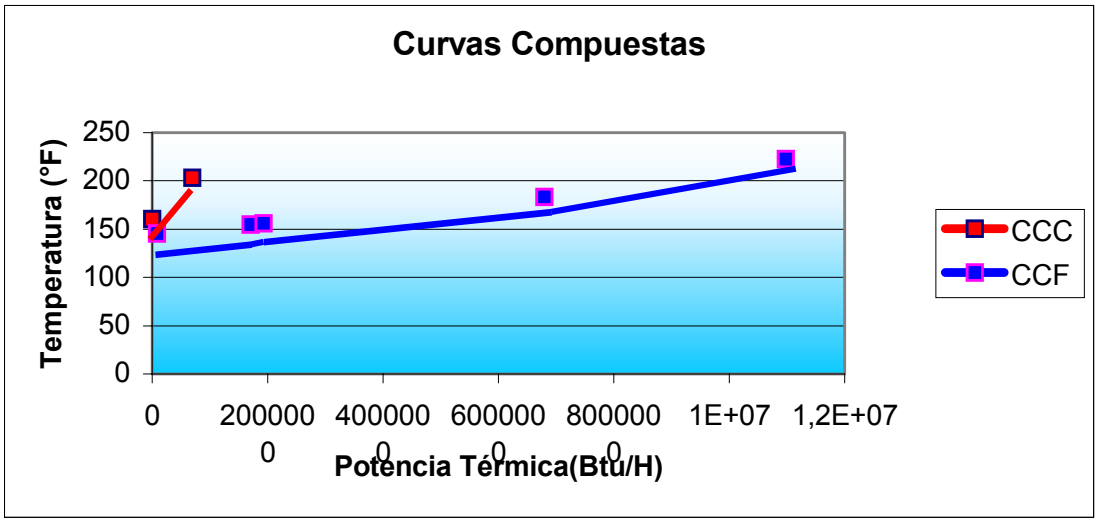


Figura 31 Curvas compuestas del sistema para una configuración de temperaturas dada y ΔT_{min} igual a diez

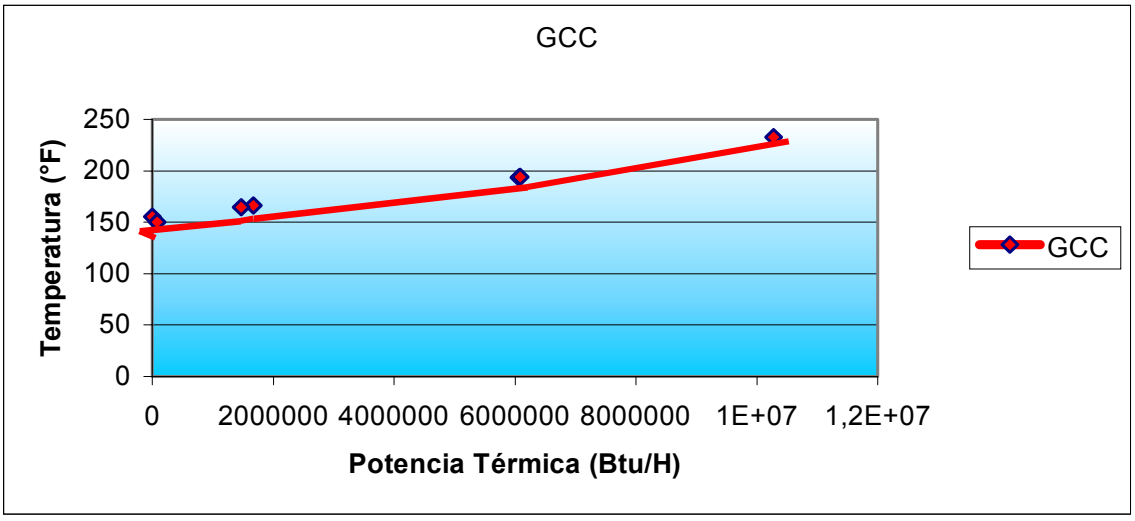


Figura 32 Gran Curva Compuesta del sistema para una configuración de temperaturas dada y ΔT_{min} igual a diez

En el caso de las curvas compuestas, a medida que disminuye el ΔT_{min} la curva compuesta fría (CCF) se acerca a la curva compuesta caliente (CCC), por medio de un desplazamiento hacia la izquierda. Así, es posible lograr que el sistema opere satisfactoriamente con el $\Delta T_{min,}$ lo cual genera una reducción en los consumos de vapor de 50 psi bastante representativa. Esto puede ser alcanzado haciendo pequeñas variaciones (reducciones) en los flujos másicos de las corrientes del set, lo que se explica en términos del calor requerido por cada una de ellas y por la forma en que ellas interactúan.

En el caso de la "gran curva compuesta", a medida que disminuye el ΔT_{min} se reduce levemente el valor del punto Pinch (punto de H=0), con lo que se ve disminuida la sección de las corrientes frías. Éstas son las que se encuentran debajo del punto Pinch, lo que implica que el requerimiento de corrientes externas para enfriar el sistema disminuye levemente. Esto se debe a que para lograr la situación aquí expuesta las corrientes están llegando menos calientes debido a los ajustes expuestos en el párrafo anterior.

Las dos situaciones antes descritas representan es el balance energético propiamente dicho, ya que indican cuál es la cantidad de calor óptima requerida por cada corriente, evitando así que éstas se calienten más de lo estrictamente necesario. El hecho de suministrar a las corrientes más calor de lo necesario supone que exista transferencia de calor a través del punto Pinch y que por lo tanto este calor deba ser retirado por corrientes externas al sistema.

Durante el desarrollo del trabajo fueron alcanzando ciertos objetivos con la finalidad de realizar un estudio energético al set de evaporadores, la razón de ser de este estudio fue lograr optimizar el consumo de vapor vivo en el Set de evaporadores.

A continuación se presentan algunas apreciaciones objetivas derivadas del análisis de resultados y de la experiencia desarrollada de dicho estudio y algunas recomendaciones pertinentes al caso.

Conclusiones:

Caracterización preliminar y estudio Probabilístico:

- A excepción de las concentraciones del licor y el flujo másico de vapor de 50 psi, todas las variables del sistema se encuentran dentro de los intervalos de operación del Set
- Por su parte la baja concentración del licor que sale hacia la caldera se debe fundamentalmente a la baja concentración del licor proveniente de planta de pulpa, para solventar esta situación pueden plantearse dos recomendaciones
- El consumo de vapor de 50 psi esta por debajo de los parámetros establecidos, alrededor de 5 klbs/h, esto se debe a la baja rata de licor que entra y sale del set durante el periodo estudiado

El simulador y sus corridas

- Debido a su estructuración solo puede operar en la URQ de Mocarpel
- Puede ser utilizado no solo para predecir el comportamiento del set ante ciertos eventos, además, con el pueden realizarse estudios de los efectos de las variaciones de ciertos parámetros de operación

- El error que arrastra en sus cálculos oscila entre un 0,42 y 1,2 % el cual puede ser ajustado modificando las perdidas del sistema
- Por ser abierto al usuario es posible modificar parámetros tan significativos como perdidas de calor asociadas al Set, poderes calorífico, entalpías etc.
- Antes durante y después de la simulación es posible ajustar valores de temperatura de las corrientes
- A pesar de no haber realizado las corridas con las tres etapas del simulador, este arrojo ahorros energéticos de hasta 600 lbs/h por lo que se espera, que utilizando las tres fases se alcancen ahorros en el consumo de vapor cercanos a las 4000 lbs/h, lo que constituye cerca del 10 % del consumo energético del Set
- En las curvas compuestas del sistema, a medida que disminuye el ΔT_{min} la curva compuesta fría se acerca a la caliente mediante un desplazamiento hacia la izquierda, esto puede ser logrado por ajustes en los flujos másicos del sistema
- Los resultados asociados con estas curvas son bien significativos, ya que variando el ΔT_{min} en unos cuantos grados se obtuvieron reducciones del consumo de vapor vivo de hasta 470 lbs/h de lo ya reducido por las otras etapas del simulador lo que significa aproximadamente un 2 % de ahorro energético solo aplicando tecnología Pinch
- En las "gran curva compuesta" a medida que disminuye el ΔT_{min} se reduce levemente el valor del punto Pinch, con lo que se ve disminuida la sección de las corrientes frías, y por lo tanto los servicios externos requeridos

En términos generales se puede asegurar que el simulador es una herramienta muy poderosa a la hora de utilizarlo para estudios posteriores en la URQ,

Recomendaciones:

Caracterización preliminar y estudio Probabilístico:

- La primera, que fundamentalmente busca satisfacer a toda costa los requerimientos de la caldera, consiste en recircular el licor hasta alcanzar la concentración apropiada.
- La segunda es hacer un estudio en planta de pulpa con la finalidad de adecuar el licor que envían a la URQ; esta situación resulta atractiva y muy importante debido a la gran influencia que tienen las características físico químicas del licor a la hora de su quemado en la caldera. El simulador es capaz de cuantificar la influencia de estas propiedades en función de la eficiencia térmica de la caldera

El simulador y sus corridas

- En este sentido es recomendable entrenar bien a los usuarios del simulador, con la utilización de las auto ayudas de este, para que así puedan sacarle el mayor provecho, realizar corridas del simulador entero, es decir de sus tres etapas, para terminar de ponerlo a punto.
- Complementarlo con los procedimientos de la tecnología Pinch que se indicaron anteriormente para que directamente el simulador indique y simule con las variaciones requeridas para la optimización, con lo que se podría esperar quizás un 1,5 % adicional en el ahorro energético
- Para poder llegar a implementar sus resultados, es necesario seguir haciendo corridas preferiblemente de las tres etapas

- Aun cuando el simulador se limita a la URQ, la tecnóloga Pinch es aplicable a cualquier sistema en donde exista intercambio de calor, y dado que Mocarpel posee un gran numero de procesos con estas características, es recomendable comenzar a implementar esta en otras áreas en donde el consumo de vapor es mucho más representativo que en la URQ

BIBLIOGRAFIA

(1). - SHENOY, Uday V. "Exchanger Network Synthesis", Gulf Publishing Company, Houston, 1995, Pág. (1 – 131).

(2).- POTTER, Merle C. "Mecánica de Fluidos", Edit. Prentice Hall, México, Segunda Edición, 1997, Pág. (1 – 22).

(3). - LINNHOFF B y E. HINDRAMARSH, E. "The Pinch design Method for a Heat Exchanger Networks", Chem. Eng. SCI., 1983, Pág. (745 – 763).

(4).- DEITEL, H. y DEITEL, P. "Como programar en C/C^{++}", Edit. Prentice Hall, Barcelona, Segunda Edición, 1995, Pág. (561 – 723).

(5). - FLOWER J. R. Y B. LINNHOFF "Synthesis of heat Exchanger Network", AIChE J., 1978, Pág. (633 – 654).

(6). - FLOUDAS Christodoulos A. "Nonlinear and Mixed Integer optimization, fundamentals and applications", Oxford University Press, New York, 1995, Pág. 462.

(7). – GROSSMAN, S. "Álgebra Lineal", Edit Mc Graw Hill, México, Quinta edición, 1996, Pág. (2 – 172).

(8). – VAN WYLEN, G. "Fundamentos de Termodinámica", Edit Limusa, México, Segunda edición, 1995, Pág. (35 – 242).

(9). – HOLMAN, J. P. “Transferencia de Calor”, Edit Mc Graw Hill, México, Octava edición, 1998, Pág. (1 – 31).

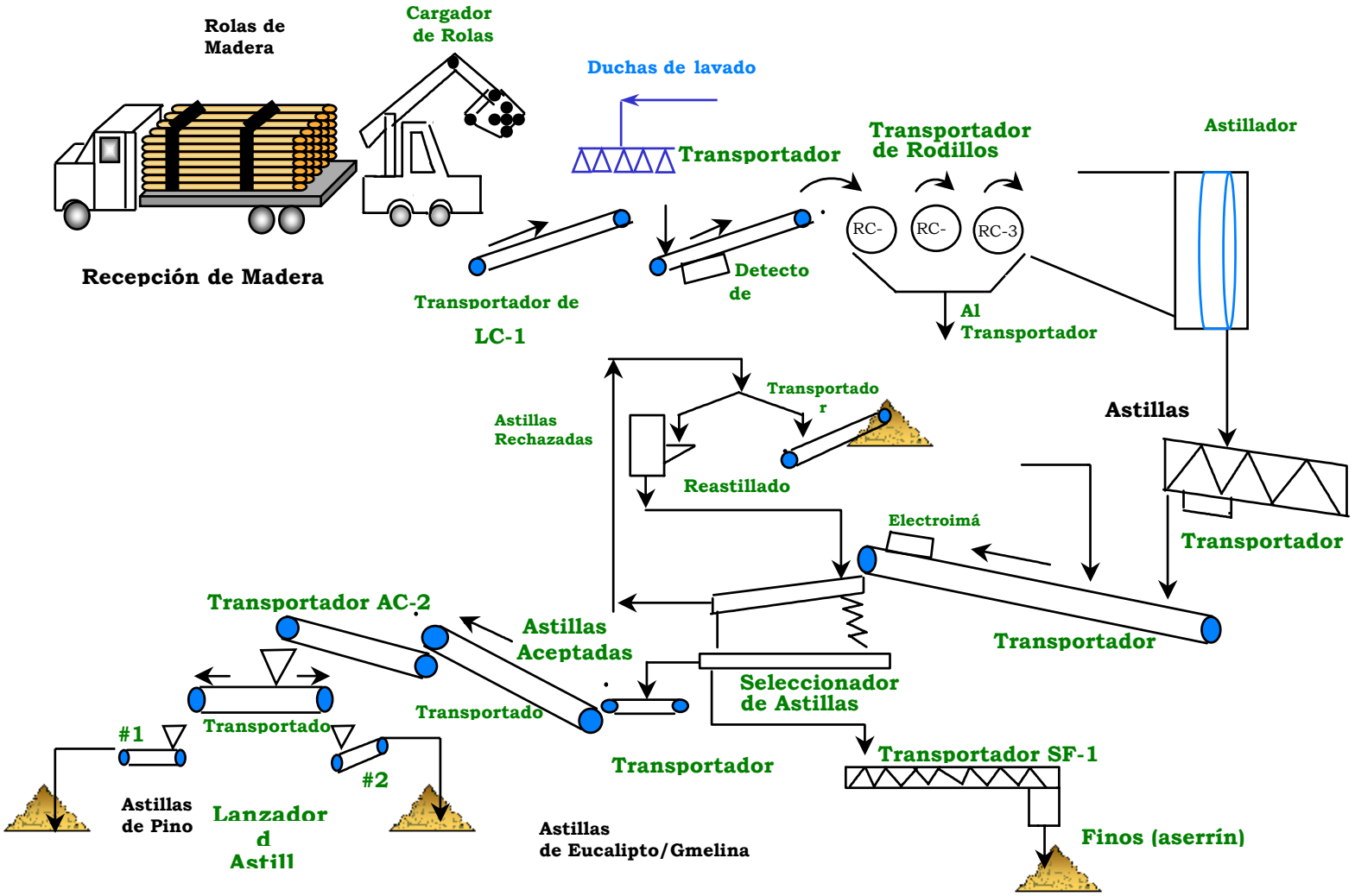
(10). – DANTZING, G. “Linear Programming and Extensions” Oxford University Press, New York, 1985, Pág. (250 – 300).

(11). - BIEGLER Lorenz, I. E. GROSSMAN y A. WESTERBERG “Systematic Methods of Chemical process design”, Prentice Hall, 1997, New York, Pág. 815.

(12). – FOSBERG, Ted. “Evaporation Principles”, TAPPI, Kraft Recovery Operations Seminar, Orlando, Florida, 1986, Pág. (85 – 99).

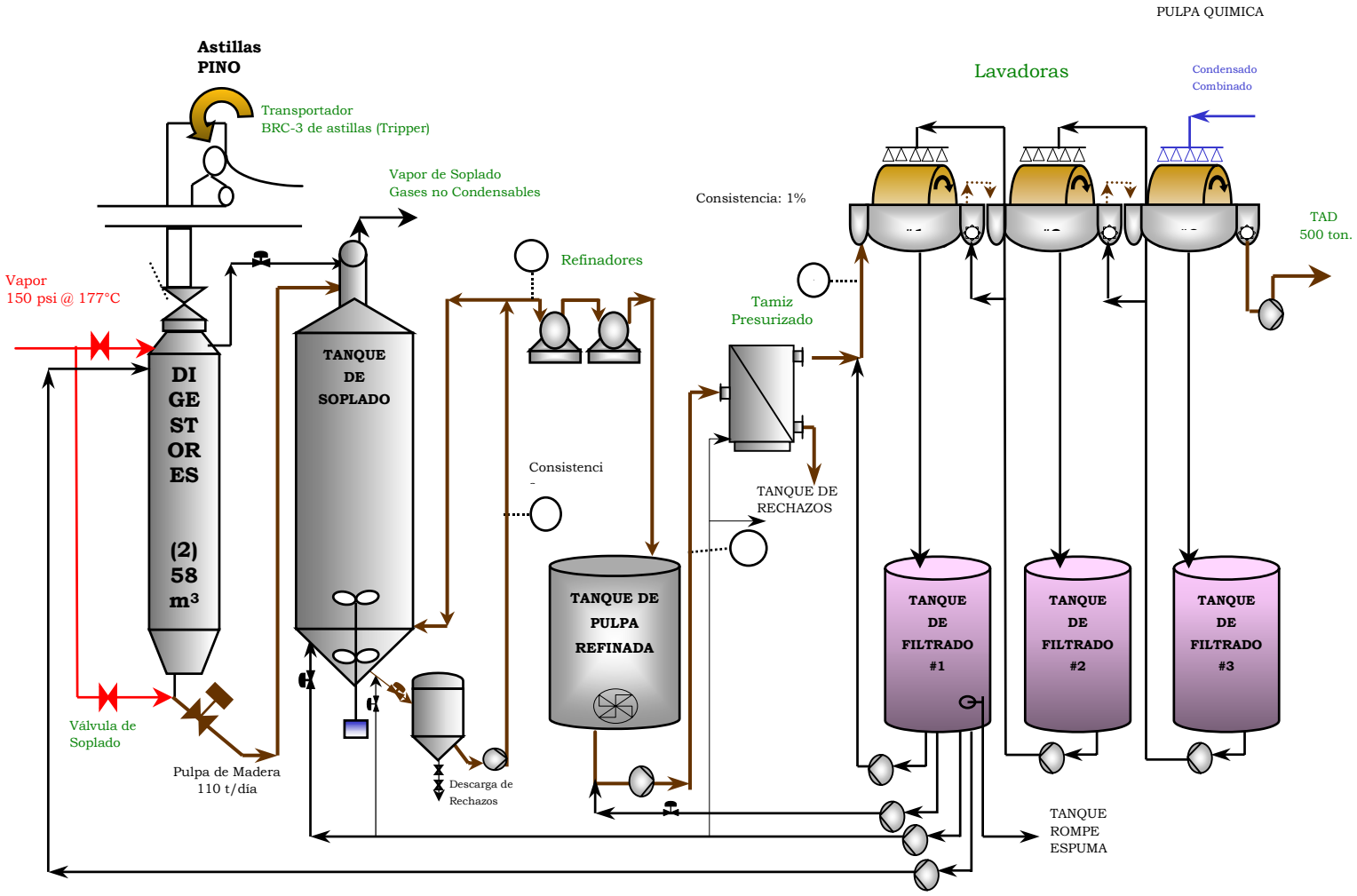
Smurfit
Cartón de Venezuela, S.A.

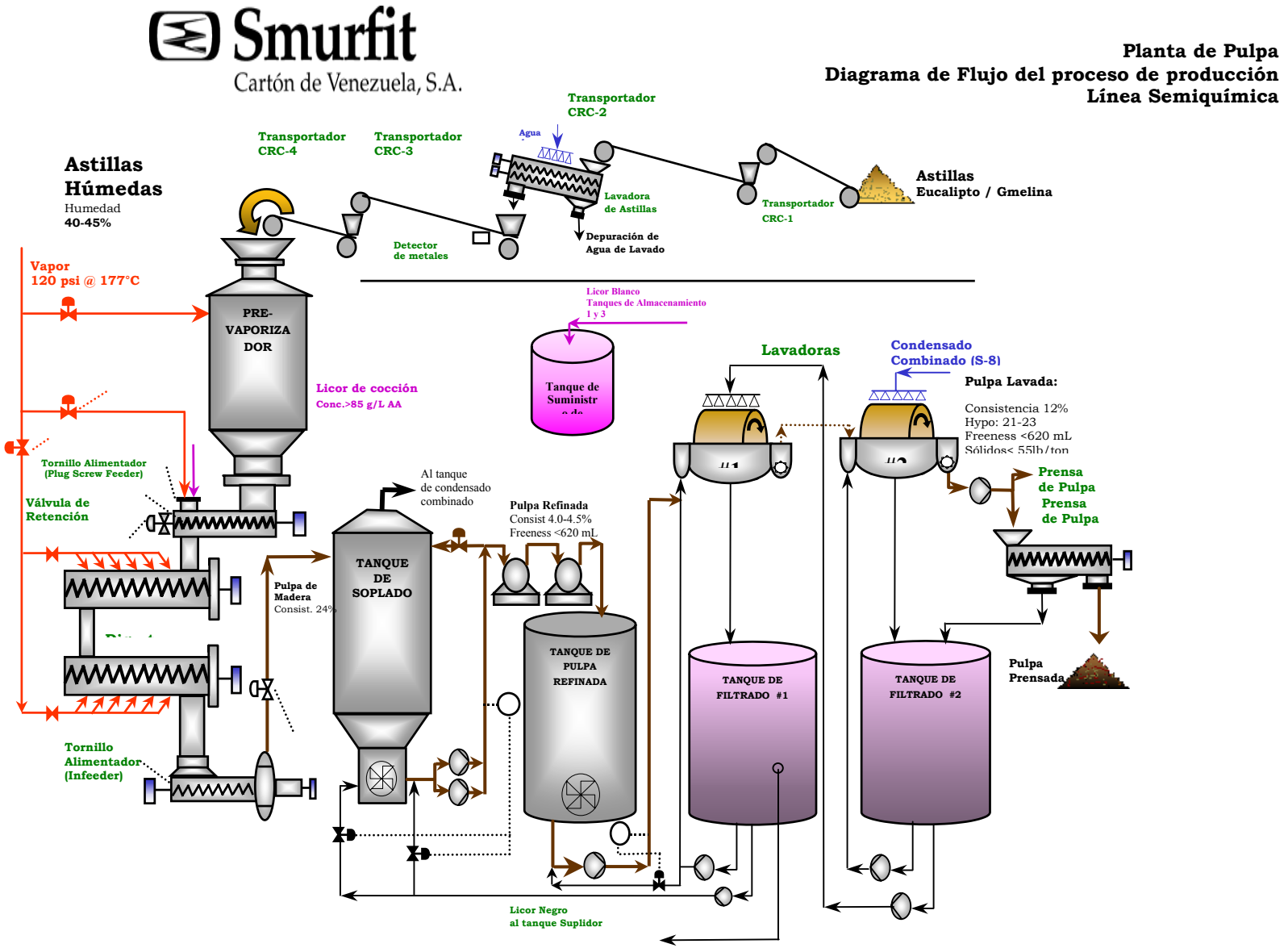
Diagrama de Flujo del Proceso de producción de astillas



Smurfit
Cartón de Venezuela, S.A.

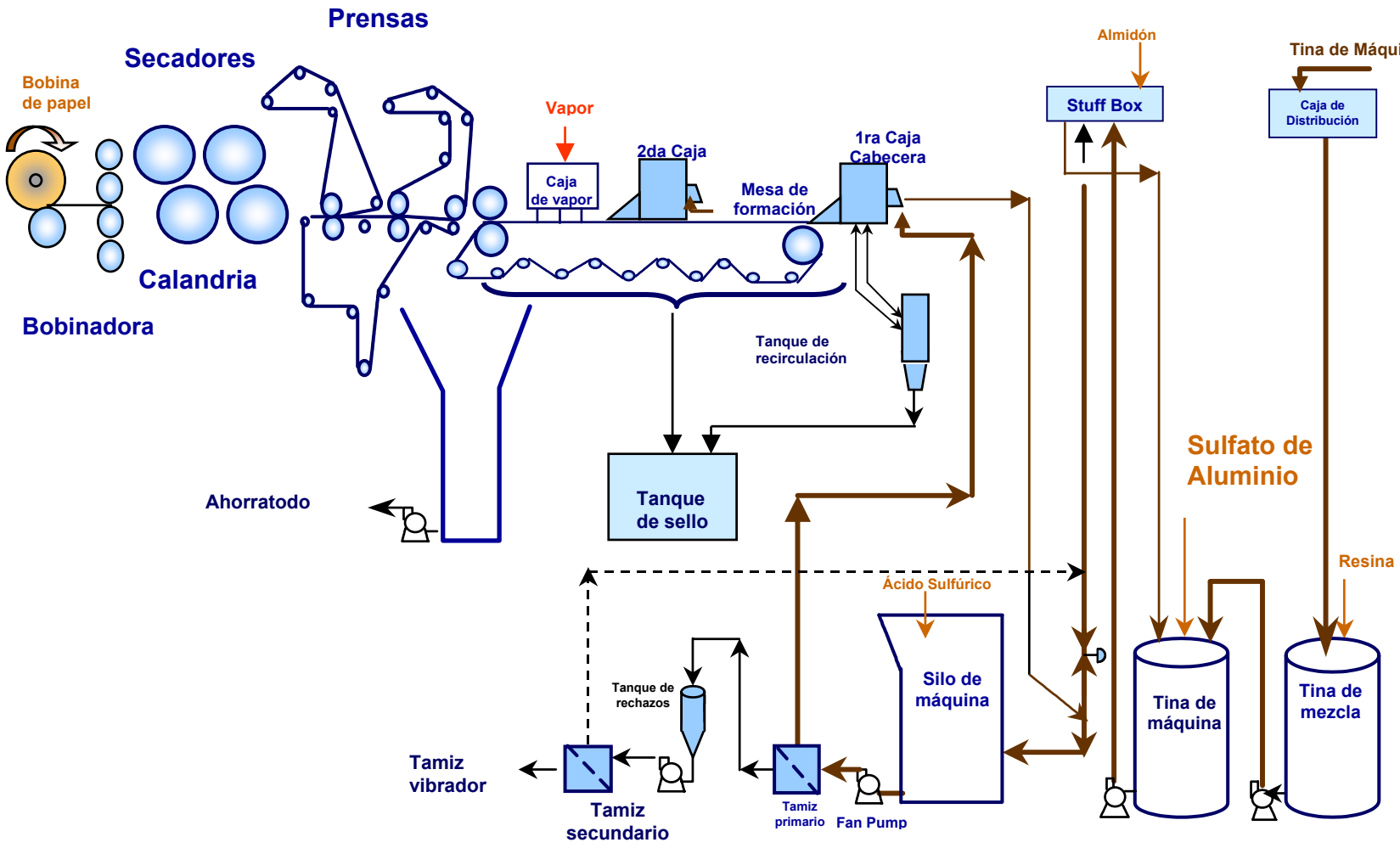
Planta de Pulpa
Diagrama de Flujo del proceso de producción
Línea Química

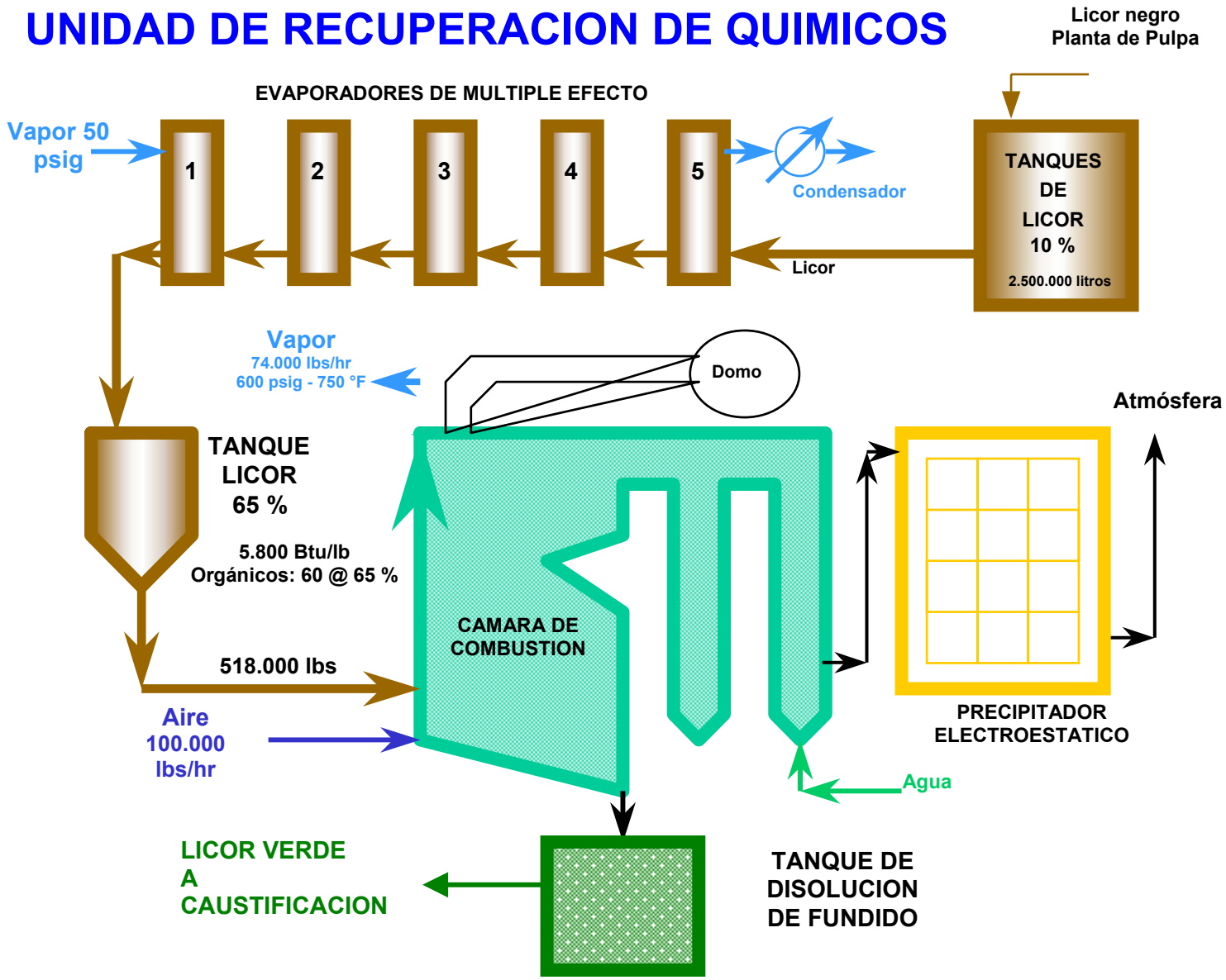



Smurfit
Cartón de Venezuela, S.A.
Planta de Pulpa
Diagrama de Flujo del proceso de producción
Línea Semiquímica
Astillas Húmedas
Humedad 40-45%
Transportador CRC-4
Transportador CRC-3
Transportador CRC-2
Agua
Lavadora de Astillas
Depuración de Agua de Lavado
Transportador CRC-1
Astillas Eucalipto / Gmelina
Detector de metales
Vapor 120 psi @ 177°C
PRE-VAPORIZADOR
Licor de cocción Conc.>85 g/L AA
Licor Blanco Tanques de Almacenamiento 1 y 3
Tanque de Suministro
Lavadoras
Condensado Combinado (S-8)
Pulpa Lavada:
Consistencia 12%
Hypo: 21-23
Freeness <620 mL
Sólidos< 55lb/ton
Tornillo Alimentador (Plug Screw Feeder)
Válvula de Retención
Al tanque de condensado combinado
Pulpa Refinada
Consist 4.0-4.5%
Freeness <620 mL
Prensa de Pulpa
Prensa de Pulpa
TANQUE DE SOPLADO
Pulpa de Madera
Consist. 24%
TANQUE DE PULPA REFINADA
TANQUE DE FILTRADO #1
TANQUE DE FILTRADO #2
Pulpa Prensada
Tornillo Alimentador (Infeeder)
Licor Negro al tanque Suplidor

Smurfit
Cartón de Venezuela, S.A.

Diagrama de Flujo de la Máquina de Papel




UNIDAD DE RECUPERACION DE QUIMICOS
Licor negro
Planta de Pulpa
EVAPORADORES DE MULTIPLE EFECTO
Vapor 50
psig
1
2
3
4
5
Condensador
TANQUES
DE
LICOR
10 %
2.500.000 litros
Licor
Vapor
74.000 lbs/hr
600 psig - 750 °F
Domo
Atmósfera
TANQUE
LICOR
65 %
5.800 Btu/lb
Orgánicos: 60 @ 65 %
CAMARA DE
COMBUSTION
518.000 lbs
Aire
100.000
lbs/hr
PRECIPITADOR
ELECTROESTATICO
Agua
LICOR VERDE
A
CAUSTIFICACION
TANQUE DE
DISOLUCION
DE FUNDIDO

Proceso de Caustificación

