UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FQF
Facultad de
Química y Farmacia

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Análisis Complejo de Procesos en la Destilería ´´Agustín Rodríguez Mena´´.

Autora: Blanca Elena Suárez Martí.

Tutores: Dra. Marlén Morales Zamora.
MSc. Mayra Guzmán Villavicencio.
Consultante: Ing. Yoan Oliver López.

Curso: 2017-2018

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual

Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento:

Necesitamos crear nosotros mismos, hacer ciencia nosotros mismos y no pasarnos la vida rezando las verdades y los errores que nos legaron otros. Mientras no hagamos eso, seremos los eternos ignorados en el mundo científico y los eternos incapaces para resolver nuestros problemas de acuerdo con la realidad propia.

Ignacio Chávez
Médico mexicano
(1897-1980)

Dedicatoria:

La constancia de pequeños detalles, construye grandes cosas por lo que dedico este trabajo a:

Mi mamá

*Por su esfuerzo, comprensión, apoyo, amor, y tantas cosas que me brinda todos los días, porque sin ella no hubiera tenido fuerzas para continuar y vencer, porque sin lugar a dudas ´´**es la mejor madre del mundo´´.***

A mi papá

Por nunca perder la esperanza en mí, por hacerme reír cuando más lo necesito y siempre apoyarme en las decisiones que he tomado.

A mi tía

Por ser mi fuente de inspiración, ojalá algún día llegara a ser como ella.

A mis tíos

Por siempre recibir su apoyo incondicional y ser tan especiales.

*A mis queridos **hermanos** Bryan y Any.*

Agradecimientos:

Cuando se llega a momentos como este, únicos en la vida, siempre se reserva un instante para meditar y recordar lo largo y difícil que ha sido el camino, pero lo corto y relativamente fácil que ha parecido porque se ha contado con el apoyo incondicional y la compañía de personas que en una sola hoja de este trabajo de diploma no se podrían mencionar, por tanto y para no excluir a ninguna de esas personas solo quiero agradecer de forma muy especial:

- *A toda mi familia que siempre ha tenido sus brazos abiertos para ayudarme, especialmente a mis padres, tíos, hermanos y primos por todo el apoyo que siempre me han dado, por tener absoluta confianza en mí.*
- *A Carol por ayudarme con la búsqueda bibliográfica y su apoyo incondicional.*
- *A Lenier por levantarme el ánimo cuando las ganas estaban en el suelo.*
- *A Dayneris, Aurora, y Vinniela, mis amigas, que a pesar de estar separadas y no estudiar la misma carrera, siempre han estado y estarán ahí…*
- *A todos mis compañeros de aula por compartir tanto los buenos como malos momentos en estos cinco años, nunca los olvidaré… en especial: Faby, por ser mi mayor aliada y soportarme en cada momento que la estresaba, a Mario, por siempre creer en mí y ser incondicional, a Aurea por ayudarme y brindarme su casa en momentos difíciles, a Mariam, que aunque no es química es una más entre nosotros.*
- *A Yedier por ser mi camaroncito duro, y dedicar su tiempo a repasarnos en tantas ocasiones.*
- *A mi tutora Marlén, por su dedicación y comprensión en todo momento. Al claustro de profesores del Departamento de Ingeniería Química.*
- *A los trabajadores de la destilería ¨Agustín Rodríguez Mena¨, en especial a Yoan y Mayra.*

A todos los que preguntaron: ¿Cómo te va la tesis? ¿Te falta mucho? Gracias por la preocupación.

Resumen

En el presente trabajo se realizó un Análisis Complejo del Proceso en la destilería ´´Agustín Rodríguez Mena´´, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia y calidad en el proceso de rectificación de alcohol y en los sistemas auxiliares. Se comenzó con un diagnóstico integral al proceso detectando los principales puntos débiles. En el caso de la materia prima, el Alcohol Técnico B (flema), debido a la variedad de suministradores, se detectó que existen variaciones en las composiciones de la flema, sobre todo en los compuestos n-propanol e isobutanol. Se realiza una caracterización de los principales portadores energéticos y sistemas auxiliares; se describe la calidad del aire, siendo más representativo las composiciones de dióxido de azufre a la salida, debido al elevado por ciento de azufre en el crudo cubano 6,5%. Al determinar la eficiencia de la caldera se obtiene un 86%. Para el análisis de las alternativas propuestas, se utiliza el simulador Aspen Plus. Se diseñó la columna recuperadora, para una altura de 4,75 m, diámetro de 0,95 m y 20 platos, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a las composiciones de alcohol en el residuo y destilado siendo de 0,01% y 0,945% respectivamente. Se incorporó el diseño al sistema de rectificación completo, obteniendo buenos resultados con el análisis de los perfiles de composiciones en cada plato. Se obtienen los balances de masa y energía para la rectificación de alcohol y para la generación de vapor, así como el análisis de sensibilidad de las variables. Con la propuesta tecnológica se obtuvo resultados económicos favorables para un VAN de $ 96 414,28, una TIR de 40% y un PRD de 2 años.

Palabras Claves: destilería, alcohol, eficiencia, simulación, diseño, columna, impureza e inversión.

Abstract

In the present work, a Complex Analysis of the Process was carried out in the ´´Agustín Rodríguez Mena´´ distillery, with the objective of achieving greater efficiency and quality in the alcohol rectification process and in the auxiliary systems. It began with an integral diagnosis to the process detecting the main weak points. In the case of the raw material, Technical Alcohol B (phlegm), due to the variety of suppliers, it was detected that there are variations in phlegm compositions, especially in the n-propanol and isobutanol compounds. A characterization of the main energy carriers and auxiliary systems is carried out; the air quality is described, being more representative the sulfur dioxide compositions at the exit, due to the high percent of sulfur in the Cuban crude 6,5%. When determining the efficiency of the boiler, 86% is obtained. For the analysis of the proposed alternatives, the Aspen Plus simulator is used. The recovery column was designed, for a height of 4,75 m, diameter of 0,95 m and 20 plates, obtaining satisfactory results in terms of the alcohol compositions in the residue and distillation being 0,01% and 0,945% respectively. The design was incorporated into the complete rectification system, obtaining good results with the analysis of the profiles of compositions in each dish. The mass and energy balances are obtained for the rectification of alcohol and for steam generation, as well as the sensitivity analysis of the variables. With the technological proposal, favorable economic results were obtained for a VAN of $ 96414, 28, a TIR of 40% and a PRD of 2 years.

Key words: distillery, alcohol, efficiency, simulation, design, column, impurity and investment.

Índice

Introducción 1

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. 4

1.1 Alcohol etílico. Importancia y usos. 4

1.1.1 Propiedades físicas y químicas. 4

1.2 Destilación de alcohol etílico. 5

1.2.1 Tipos de destilación. 6

1.2.2 Principales equipos utilizados para la destilación de alcohol. 9

1.2.3 Principales componentes de una columna de destilación. 10

1.2.4 Ventajas y desventajas de la destilación. 11

1.3 Proceso de rectificación de alcohol. 12

1.3.1 Teorías sobre la eliminación de impurezas en el alcohol. 13

1.3.2 Sistemas auxiliares para el proceso de rectificación de alcohol. 15

1.4 Generación de vapor. Consideraciones generales. 18

1.4.1 Diferentes tipos de generadores de vapor. 19

1.4.2 Principales combustibles y características fundamentales. 20

1.5 Análisis Complejo de Procesos en la industria (ACP). 23

1.5.1 Simulación de procesos como herramienta para el ACP. 25

CAPITULO 2. ANÁLISIS DEL PROCESO EN LA PLANTA DE RECTIFICACIÓN DE ALCOHOL. 29

2.1 Metodología para el Análisis Complejo del Proceso de rectificación de alcohol. . 29

2.2 Caso de estudio. 30

2.2.1 Parámetros de control del proceso de rectificación de alcohol. 32

2.3 Diagnóstico Integral en el proceso de rectificación de alcohol. 34

2.3.1 Materias primas. Características. 34

2.4 Principales portadores energéticos y sistemas auxiliares. 36

2.4.1 Principales puntos débiles detectados en los sistemas auxiliares. 40

2.5 Diagnóstico en el sistema de generación de vapor. Evaluación del sistema actual. 41

2.5.1 Caracterización de la calidad del aire. 42

2.5.2 Cálculo de la eficiencia de la caldera. 43

CAPITULO 3. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS. 46

3.1 Diseño de la columna recuperadora de alcohol fino usando el Aspen Plus. 46

3.1.1 Aplicación del modelo de la columna recuperadora. 52

3.1.2 Incorporación de la columna al sistema completo. 53

3.2 Simulación del sistema de Generación de Vapor. 56

3.2.1 Análisis de sensibilidad 61

3.3 Evaluación económica del diseño de la columna recuperadora. 65

Conclusiones 69

Recomendaciones 70

Bibliografía 71

Introducción

El alcohol etílico es la sustancia psicoactiva de mayor consumo en el mundo, siendo los mayores productores Estados Unidos, Brasil, China y la Unión Europea. La producción de etanol ha crecido debido a los elevados precios de la energía y la desmedida demanda de los países capitalistas industrializados, con estadísticas que reportan 60 000 MM de litros en el 2015, y se espera que para el 2020 se duplique en unos 120 000 MM de litros (Díaz et al., 2016).

Actualmente la demanda de etanol en Cuba es superior a las posibilidades de suministro, y la materia prima tradicionalmente empleada miel final de caña, cada día es más cotizada debido al incremento de las producciones biotecnológicas (Fernández, 2010).

La producción de alcohol en nuestro país ha crecido en 1,5 % en comparación con el 2011, disminuyéndose los consumos de miel y combustibles, por lo que ha disminuido los costos de producción. El país cuenta con 12 destilerías, 7 destinadas al aumento de sus capacidades de producción, 12 fábricas de ron, donde dichas marcas están registradas en más de 50 países (Companioni, 2017).

El desarrollo de nuevas tecnologías industriales es uno de los principales retos que enfrenta el país hoy en día, en aras de lograr una disminución de importaciones y a la vez promover las exportaciones, estas últimas de vital importancia para el desarrollo económico. Es apreciable la cantidad de instalaciones de procesos químicos introducidos en el país a través de los diversos mecanismos de transferencia tecnológica, que han operado ineficientemente, desde el propio inicio de sus operaciones, con comportamientos anómalos y sin la adecuada proyección de las innovaciones tecnológicas. Esta situación es atribuible en un alto grado a una insuficiente información tecnológica previa, a la recepción y explotación de la tecnología sin una consecuente aplicación de herramientas ingenieriles.

En aras de potenciar el desarrollo tecnológico, la Corporación Cuba Ron S.A, en específico la Ronera Central, se mantiene trabajando y desarrollando acciones encaminadas a la introducción de mejoras tecnológicas en sus instalaciones y procesos.

Si bien en la Ronera Central, se ha ganado conciencia en cuanto a la importancia de la innovación tecnológica y de su decisiva importancia para el desarrollo, eficiencia y permanencia de sus empresas, resulta todavía insuficiente, en términos generales, los resultados relacionados con la innovación tecnológica que se obtienen y generalizan

anualmente, en los que influyen, entre otros factores, la escasa experiencia existente sobre los procesos tecnológicos y de innovación. Es por ello que se puede afirmar que el sector no cuenta aún con una metodología que le permita diagnosticar y evaluar sus procesos tecnológicos, para analizar los factores que inciden en su desarrollo, así como, efectuar una adecuada vigilancia del entorno tecnológico que posibilite descubrir oportunidades para mejorarlos. Por otra parte, elaborar un plan de desarrollo tecnológico estando en correspondencia con los objetivos estratégicos de la organización, le permite buscar vías pertinentes para enriquecer su patrimonio tecnológico y proteger sus productos, conocimientos y tecnologías.

La Destilería Agustín Rodríguez Mena perteneciente a dicha entidad, ha mantenido un trabajo estable en cuanto a la mejora continua de los procesos tanto de Generación de Vapor como de Destilación, basado fundamentalmente en la organización del trabajo, logrando aumentar el conocimiento integral de todos los trabajadores de la destilería, buscando ganar en eficiencia y productividad.

La destilería no está ajena a los problemas externos e internos que afectan la estabilidad y eficiencia de la misma, desde la variación de las materias primas como de los portadores energéticos involucrados en este proceso. Partiendo de esto, se hace eminente para su intensificación, un Análisis Complejo del Proceso de manera que, a partir de un diagnóstico integral y propuestas de alternativas tecnológicas, brinde un fortalecimiento del patrimonio tecnológico en armonía con el medio ambiente.

Problema científico:

No existe un adecuado desarrollo de la gestión de la innovación en la destilería que permita fortalecer el patrimonio tecnológico de la empresa hacia la producción de tecnologías más eficientes, estables y compatibles con el medio ambiente.

Hipótesis:

Es posible a partir del Análisis Complejo del Proceso de rectificación de alcohol fino, lograr el perfeccionamiento de la gestión de la innovación, permitiendo así fortalecer el patrimonio tecnológico de la empresa, dirigido a su eficiencia y compatibilidad medioambiental.

Objetivo general:

Evaluar técnico y económicamente alternativas tecnológicas en el proceso de rectificación de alcohol fino, a partir de un Análisis Complejo de Proceso de manera que permita, elevar la eficiencia y estabilidad en la empresa.

Objetivos específicos:

1. Realizar un diagnóstico integral del proceso de rectificación de alcohol basado en los criterios del Análisis Complejo de Proceso.
2. Proponer y evaluar alternativas tecnológicas en la destilería para el mejoramiento de la eficiencia y estabilidad operacional.
3. Evaluar económicamente el impacto de la propuesta tecnológica.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

1.1 Alcohol etílico. Importancia y usos.

El término alcohol es aplicado a los miembros de un grupo de compuestos químicos de carbono que contienen el grupo OH. Dicha denominación se utiliza comúnmente para designar un compuesto específico: el alcohol etílico o etanol su fórmula química C_2H_5OH y su fórmula extendida es CH_3CH_2OH (Cervantes, 2010).

El alcohol etílico no sólo es el producto químico orgánico sintético más antiguo empleado por el hombre, sino también es uno de los más utilizados a nivel industrial. El etanol, después del agua, es el disolvente y la materia prima más común y utilizada, no solo en la industria química donde se utiliza como compuesto de partida en la síntesis de diversos productos como el acetato de etilo, disolvente para (pegamentos, pinturas, barnices, lacas), se usa con fines culinarios (bebida alcohólica), se utiliza ampliamente en muchos sectores industriales y en el sector farmacéutico, como excipiente de algunos medicamentos y cosméticos (es el caso del alcohol antiséptico 70 ºGL, en la elaboración de ambientadores y perfumes), puede utilizarse como anticongelante. También es un desinfectante. Su mayor potencial bactericida se obtiene a una concentración de aproximadamente el 70%. Se emplea como combustible industrial y doméstico. En el uso doméstico se emplea el alcohol de quemar. Su mezcla con gasolina o petróleo proporciona un combustible de mejor calidad y además puede servir como materia prima en la obtención de 1,1 dietoxietano (acetal), el cual tiene aplicación como aditivo oxigenado de combustibles líquidos, en particular el gas-oíl (Acosta, 2012).

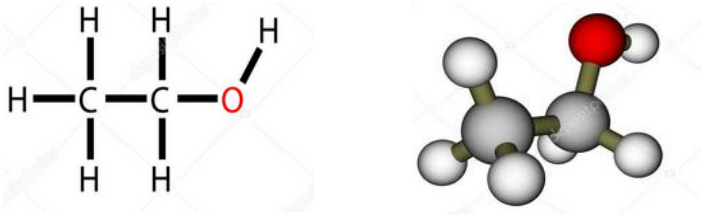
1.1.1 Propiedades físicas y químicas.

El alcohol etílico es un líquido transparente, incoloro con un olor característico y un sabor ardiente (Chemistry, 2015). Su masa molar es de 46,06 g/mol, punto de fusión y de ebullición son de -114 ºC y 78 ºC, respectivamente. Es un líquido volátil, su densidad es 0,789 g/ml, presenta pH neutro. El alcohol etílico es también inflamable y produce una llama azul sin humo. Es miscible con agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos tales como ácido acético, acetona, benceno, tetracloruro de carbono, cloroformo y éter. Mezclable con agua en cualquier proporción; a la concentración de 95 % en peso se forma una mezcla azeotrópica (Database, 2017).

El etanol es un hidrocarburo alifático, compuesto ternario formado de carbono, oxígeno e hidrógeno; su composición centesimal es 52,15 % de carbono, 34,33 % de oxígeno y 13,12

% de hidrógeno, su grupo funcional es el hidroxilo unido directamente a un carbono. Las propiedades químicas del etanol son primordialmente las del grupo hidroxilo, pero en cierto número de reacciones tiene parte importante el grupo metilo. Por la acción de los ácidos orgánicos e inorgánicos, se forman los ésteres correspondientes, los cuales, por hidrólisis se descomponen en alcohol y en ácido.

El alcohol etílico reacciona con algunos metales y forma etóxidos. El grupo hidroxilo es reemplazado por un halógeno con los reactivos usuales (haluros de hidrógeno y de fósforo). Por medio de la deshidratación del etanol se puede conseguir etileno o éter di etílico. El etanol reacciona con el grupo carbonilo de aldehídos y cetonas para formar acetales. La oxidación del etanol produce etanal y si aquella continúa se forma el ácido acético (Espinal and Jimenez, 2009).



Alcohol etílico (etanol)

Figura 1.1 Estructura química y molecular del alcohol etílico.

1.2 Destilación de alcohol etílico.

En la actualidad existen diversas vías para la obtención de alcohol etílico, las cuales se describen a continuación:

1- <u>Destilación de líquidos alcohólicos:</u>

A este grupo corresponden las sustancias que contienen alcohol, como son los desechos de las fábricas de vinos y cervecerías. Este sistema se usó tiempo atrás en algunos alambiques de Europa (López, 2005).

2- <u>Por síntesis de sus componentes:</u>

Este método se logró hace más de un siglo, aunque industrialmente fue establecido durante la Primera Guerra Mundial, en Europa. Principalmente se obtiene de sustancias derivadas de petróleo.

Hace unos años este método tendía a superar a la producción de alcohol por fermentación, más en la actualidad, este último se ha impuesto.

3- Por fermentación y posterior destilación:

Este proceso requiere una materia fermentable, un agente fermentativo y un equipo para separar el alcohol. En la actualidad el 70 % del alcohol producido en el mundo es por esta vía.

La destilación es una operación unitaria que se caracteriza por ser una de las operaciones de Transferencia de Masa más común y preferida en el ámbito industrial (Montaya, 2012).

Es una operación de contacto gas-líquido y de contra difusión, fundamentalmente para la separación de mezclas líquidas homogéneas, la cual tiene como objetivo general, la separación de componentes de una solución basado en sus diferencias en las presiones de vapor a una temperatura dada. Es la separación física de una mezcla en dos o más fracciones que tienen distintos puntos de ebullición o volatilidades diferentes. La separación depende de la distribución de los componentes en las dos fases por lo que se aplica a los sistemas en que todos los componentes están distribuidos en proporciones diferentes en las dos fases. La fase de vapor estará siempre enriquecida en el componente de menor punto de ebullición, mientras que la fase líquida se enriquece o tiene en menor proporción a los menos volátiles (Geankoplis, 1998).

1.2.1 Tipos de destilación.

Una manera de clasificar los distintos tipos de destilación es mediante la forma de funcionamiento de la columna, es decir, actividad continua o discontinua.

- Destilación Continua.

La destilación continua, también llamada fraccionada, se basa en una alimentación controlada y continua de la mezcla a separar. Una vez que la mezcla entra en la columna se produce la separación continua de los componentes, la fracción ligera sale por la parte superior de la columna y la fracción pesada deja la columna por el fondo.

En este tipo de destilación, la composición de los productos a separar permanece constante en cada sección de la columna, motivo por el cual se utiliza una corriente llamada reflujo, que es una recirculación del líquido extraído desde el tope. Aprovechando la evaporación y la condensación sucesiva en la extracción, se obtienen los productos destilados con características definidas previamente en el diseño del equipo.

El éxito de la destilación por lotes como método de separación se debe principalmente a su flexibilidad y versatilidad utilizando solo una columna o, en casos que lo requieran, varias

columnas Batch en serie. Estos atributos son esenciales para una respuesta rápida a una demanda del mercado caracterizado por productos con una corta duración de vida y con requisitos específicos (Mc Cabe et al., 2001).

- Destilación Batch.

Este tipo de destilación es de lejos la forma más antigua utilizada para lograr la separación de una mezcla de compuestos. Su uso ha aumentado en los últimos años, debido a los cambios en las tendencias de la industria, que se ha movido en la dirección de la producción de compuestos con valor agregado y fabricación de pequeños volúmenes de sustancias químicas y bioquímicas con características especiales.

El éxito de la destilación por lotes como método de separación se debe principalmente a su flexibilidad y versatilidad utilizando solo una columna o, en casos que lo requieran, varias columnas batch en serie. Estos atributos son esenciales para una respuesta rápida a una demanda del mercado caracterizado por productos con una corta duración de vida y con requisitos específicos (Mc Cabe et al., 2001).

La elección de uno u otro tipo de destilación depende a menudo de la clase de industria y de la cantidad a procesar. Cuando se trata de destilar grandes volúmenes, las operaciones continuas son las más convenientes. En cambio, cuando las cantidades son más pequeñas, como es el caso en la industria alimenticia, alcoholera, farmacéutica y química fina, se prefiere la destilación batch (Dier, 2012).

- Destilación por vapor.

Si dos líquidos insolubles se calientan, ninguno de los dos es afectado por la presencia del otro (mientras se les remueva para que el líquido más ligero no forme una capa impenetrable sobre el más pesado) y se evaporan en un grado determinado solamente por su propia volatilidad. Por lo tanto, dicha mezcla siempre hierve a una temperatura menor que la de cada componente por separado. El porcentaje de cada componente en el vapor sólo depende de su presión de vapor a esa temperatura. Este principio puede aplicarse a sustancias que podrían verse perjudicadas por el exceso de calor si fueran destiladas en la forma habitual (Patiño et al., 2014).

- Destilación molecular centrífuga.

Si una columna larga que contiene una mezcla de gases se cierra herméticamente y se coloca en posición vertical, se produce una separación parcial de los gases como resultado de la

gravedad. En una centrífuga de alta velocidad, o en un instrumento llamado vórtice, las fuerzas que separan los componentes más ligeros de los más pesados son miles de veces mayores que las de la gravedad, haciendo la separación más eficaz. Por ejemplo, la separación del hexafluoruro de uranio gaseoso (UF6), en moléculas que contienen dos isótopos diferentes del uranio, uranio 235 y uranio 238, puede ser llevada a cabo por medio de la destilación molecular centrífuga (Pedroni, 2014).

- Destilación destructiva.

Cuando se calienta una sustancia a una temperatura elevada, descomponiéndose en varios productos valiosos, y esos productos se separan por fraccionamiento en la misma operación, el proceso se llama destilación destructiva. Las aplicaciones más importantes de este proceso son la destilación destructiva del carbón para el coque, el alquitrán, el gas y el amoníaco, y la destilación destructiva de la madera para el carbón de leña, el ácido etanoico, la propanona y el metanol. Este último proceso ha sido ampliamente desplazado por procedimientos sintéticos para fabricar distintos subproductos. El craqueo del petróleo es similar a la destilación destructiva.

- Destilación al vacío.

Otro método para destilar sustancias a temperaturas por debajo de su punto normal de ebullición es evacuar parcialmente el alambique. Por ejemplo, la anilina puede ser destilada a 100 °C extrayendo el 93 % del aire del alambique. Este método es tan efectivo como la destilación por vapor, pero más caro. Cuanto mayor es el grado de vacío, menor es la temperatura de destilación. Si la destilación se efectúa en un vacío prácticamente perfecto, el proceso se llama destilación molecular. Este proceso se usa normalmente en la industria para purificar vitaminas y otros productos inestables. Se coloca la sustancia en una placa dentro de un espacio evacuado y se calienta. El condensador es una placa fría, colocada tan cerca de la primera como sea posible. La mayoría del material pasa por el espacio entre las dos placas, y por lo tanto se pierde muy poco (Orozco, 2010).

- Sublimación.

Si se destila una sustancia sólida, pasándola directamente a la fase de vapor y otra vez a la fase sólida sin que se forme un líquido en ningún momento, el proceso se llama sublimación. La sublimación no difiere de la destilación en ningún aspecto importante, excepto en el cuidado especial que se requiere para impedir que el sólido obstruya el aparato. La

rectificación de dichos materiales es imposible. El yodo se purifica por sublimación (Emaser, 2012).

- Destilación fraccionada.

Este proceso, conocido como rectificación o destilación fraccionada, se utiliza en la industria, no sólo para mezclas simples de dos componentes (alcohol y agua en los productos de fermentación, u oxígeno y nitrógeno en el aire líquido), sino también para mezclas más complejas como las que encontramos en el alquitrán de hulla y en el petróleo.

La columna fraccionadora que se usa con más frecuencia es la llamada torre de burbujeo, en la que las placas están dispuestas horizontalmente, separadas unos centímetros, y los vapores ascendentes suben por unas cápsulas de burbujeo a cada placa, donde burbujean a través del líquido. Las placas están escalonadas de forma que el líquido fluye de izquierda a derecha en una placa, luego cae a la placa de abajo y allí fluye de derecha a izquierda. La interacción entre el líquido y el vapor puede ser incompleta debido a que puede producirse espuma y arrastre de forma que parte del líquido sea transportado por el vapor a la placa superior. En este caso, pueden ser necesarias cinco placas para hacer el trabajo de cuatro placas teóricas, que realizan cuatro destilaciones. Un equivalente barato de la torre de burbujeo es la llamada columna apilada, en la que el líquido fluye hacia abajo sobre anillos de barro o trocitos de tuberías de vidrio (Castillo, 2011).

Cuando la mezcla está formada por varios componentes, estos se extraen en distintos puntos a lo largo de la torre. Las torres de destilación industrial para petróleo tienen a menudo 100 placas, con al menos diez fracciones diferentes que son extraídas en los puntos adecuados. Se han utilizado torres de más de 500 placas para separar isótopos por destilación (Marrero, 2010).

Precisamente, la destilación continua y fraccionada será objeto de estudio en el presente trabajo en el proceso de rectificación de alcohol fino.

1.2.2 Principales equipos utilizados para la destilación de alcohol.

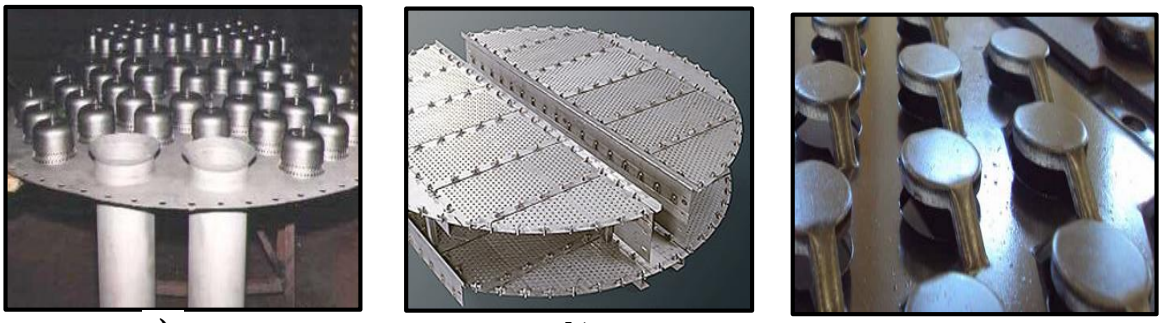
La operación industrial se lleva a cabo en etapas. El contacto por etapas es un contacto escalonado entre las fases. El plato va a proporcionar una mezcla íntima entre las corrientes de líquido y vapor. El líquido pasa de un plato a otro por gravedad en sentido descendente, mientras que el vapor fluye en sentido ascendente a través de las ranuras de cada plato, burbujeando a través del líquido.

Al plato se le exige que sea capaz de tratar las cantidades adecuadas de líquido y vapor sin una inundación o un arrastre excesivo, que sea estable en su funcionamiento y resulte relativamente simple en cuanto a instalación y mantenimiento. También es importante conseguir que la caída de presión en el plato sea mínima.

El número de platos necesarios para efectuar una separación dada vendrá determinado por factores de diseño. Por lo general cuanto mayor sea el número de platos de la torre, mayor será el grado de separación conseguida.

Se pueden encontrar diferentes tipos de platos:

- Platos de campanas de borboteo: Ha sido el plato más ampliamente utilizado, las campanas están colocadas sobre unos conductos de subida.
- Platos perforados: Su construcción es mucho más sencilla, requiriendo la perforación de pequeños agujeros en la bandeja.
- Platos de válvulas: Es un intermedio entre los de campanas o de borboteo y los platos perforados. La construcción es similar a los de campanas, cada agujero tiene por encima una válvula que se eleva ante el paso del vapor. Es la más eficiente por su autorregulación (Treybal, 1985).



a) **b)** **c)**

Figura 1.2 Tipos de platos: a) Platos de campana de borboteo, b) Platos perforados, c) Platos de válvula.

1.2.3 Principales componentes de una columna de destilación.

Las columnas de destilación constan de varios componentes, cada uno es usado ya sea para transferir energía calorífica o transferir materia. Una típica columna de destilación contiene los siguientes componentes:

- Un armazón vertical donde tiene lugar la separación de los componentes del líquido.

- Componentes internos de la columna tales como platos y/o empaquetaduras que se usan para promover la separación de componentes.
- Un bullidor que provee la vaporización necesaria para el proceso de destilación.
- Un condensador que se usa para enfriar y condensar el vapor saliente de la parte superior de la columna.
- Un tanque de reflujo que maneja el vapor condensado que viene de la parte superior de la columna de manera que el líquido (reflujo) pueda ser recirculado a la columna.

El armazón vertical aloja los dispositivos internos y junto con el condensador y el rehervidor, constituyen la columna de destilación. Un esquema de una unidad de destilación típica de alimentación simple y dos flujos de productos es mostrado abajo en la Figura 1.3 (Pérez, 2013).

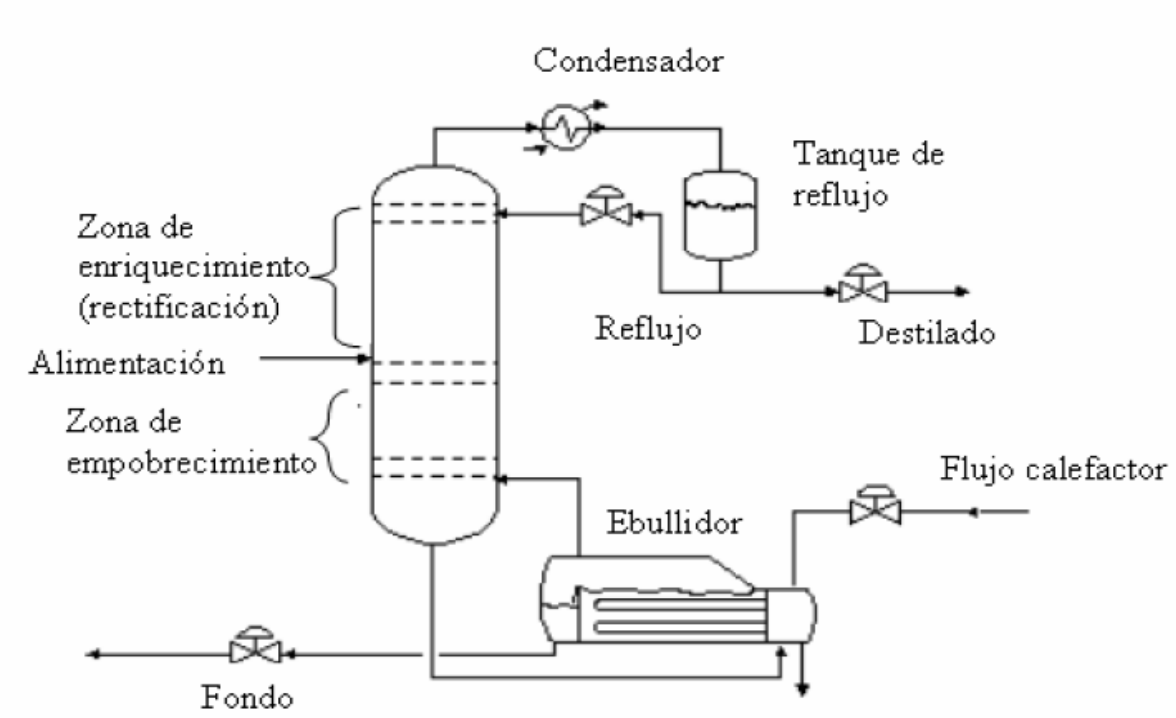


Figura 1.3 Columna de destilación y sus componentes.

1.2.4 Ventajas y desventajas de la destilación.

Ventajas:

Son varias las ventajas que sitúan a esta operación entre las más importantes en el campo de la Ingeniería Química, pero la fundamental es que separa de forma directa a los componentes lo más puro posible sin procesamiento posterior (operación directa).

Es un método simple, presenta baja inversión de capital y bajo potencial de riesgo; la nueva fase difiere de la original por su contenido calórico, pero el calor se adiciona o extrae rápidamente sin dificultad, aunque por supuesto, deberá inevitablemente considerarse el costo para hacer esto. De hecho la destilación como proceso, es difícil de vencer cuando los componentes a ser separados son térmicamente estables a su punto de ebullición y tienen una volatilidad relativa de 1,5 o más. La separación directa que es posible generalmente mediante este tipo de proceso, o sea la que permite obtener productos puros que no requieran un proceso posterior, ha hecho de la destilación una de las más importantes operaciones con Transferencia de Masa (Treybal, 1985).

Desventajas:

A pesar de la destilación ser de gran importancia en las operaciones de Transferencia de Masa tiene como aspecto negativo su baja eficiencia termodinámica por lo que se necesita hacer un estudio termodinámico a fondo de esta etapa. Presenta además otra desventaja y son sus elevados costos por conceptos de energía necesaria (Mondeja, 1987).

1.3 Proceso de rectificación de alcohol.

Para obtener alcohol exento casi totalmente de impurezas, es necesario rectificar el alcohol que se obtiene por destilación. Esta clase de alcohol, conocido como “Fino” se utiliza principalmente en la elaboración de licores, y en la obtención de esencias y perfumes (Vian and M, 2008).

Las columnas que se utilizan para eliminar casi todas las impurezas, se distinguen de las anteriores solo en pequeños detalles y comprenden los siguientes elementos:

a) Columna depuradora que separa los productos de cabeza, esto es aldehídos y sustancias de bajo punto de ebullición.

b) Columna concentradora en la que se separan los productos de cola, como alcoholes superiores o aceites de fusel, con punto de ebullición superior al alcohol etílico.

c) Columna repasadora o dispositivos de pasteurización que completa la separación de impurezas.

d) Columna rectificadora que completa el agotamiento de las vinazas y rectifica el alcohol.

En la práctica, las operaciones de destilación del vino y rectificación de las flemas obtenidas se hacen en una sola operación (Rosabal, 2013).

No es posible producir alcohol puro en la columna rectificadora por simple destilación; la pureza más alta posible es del 95-96,5 % en peso de alcohol, debido a la formación de azeótropo de la mezcla. "Un azeótropo es una mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición y que al pasar al estado vapor se comporta como un líquido puro, o sea como si fuese un solo componente" (Rosabal, 2013).

Esquemas de rectificación de alcohol fino.

Los esquemas de rectificación están basados en los mismos principios y a su vez incluyen de una manera u otra las siguientes columnas (Llanes, 2010):

1- Columna Depuradora/Hidroselectora/Extractiva: En ella tiene efecto la separación de la mayor parte de los productos de cabezas y en algunos casos de color también.
2- Columna Destiladora/Destrozadora: Elimina la mayor parte del agua de la batición junto con los sólidos suspendidos, sales minerales disueltas y otros productos no volátiles.
3- Columna Rectificadora: Su principal función es alcanzar el grado alcohólico deseado, y eliminar a su vez productos de cola.
4- Columna Repasadora/Purificadora/Pasteurizadora/Desmetilizadora: Actúa solo sobre el alcohol concentrado, completando la separación de impurezas de cabeza principalmente.

1.3.1 Teorías sobre la eliminación de impurezas en el alcohol.

Con el transcurso del tiempo se han realizado diversos estudios, los cuales han derivado una serie de teorías acerca de la eliminación de las impurezas presentes en el alcohol etílico, de los cuales se pueden mencionar a la teoría de la volatilidad relativa, la teoría de la solubilidad realizada por Sorel y la teoría del coeficiente de purificación de M. Barbet. Esta última es una modificación de la teoría de la solubilidad de Sorel y su coeficiente traduce de una manera más exacta y precisa la marcha de la purificación para el producto considerado. Por esto sólo se abordaran las teorías de la volatilidad relativa y del coeficiente de purificación K' (Campa, 1996).

1. Si la VR o K' > 1 las impurezas son de cabeza.
2. Si la VR o K' < 1 las impurezas son de cola.
3. Si la VR o K' < 1 o > 1 las impurezas son híbridas.

Eliminación de las impurezas de cabeza.

En este tipo de impurezas la volatilidad relativa o K' es mayor que uno, el porcentaje proporcional de impurezas es siempre más grande en los vapores que en el líquido. Si este

valor disminuye con el grado alcohólico el enriquecimiento proporcional del vapor irá en disminución, pero este enriquecimiento no pasará de un límite ya que el valor es mayor que uno. Las impurezas se acumularán sobre los platos superiores y constituirán las cabezas. Ejemplos: acetato de etilo, formiato de etilo, acetato de metilo, n- propanol.

Si la volatilidad relativa aumenta con la concentración alcohólica, la impureza será un tanto más una impureza de cabeza, su coeficiente de enriquecimiento crece y su eliminación será pues, mucho más fácil. Ejemplos: aldehídos, amoníaco, cetonas, etc.

Eliminación de impurezas de cola.

El mayor porcentaje de impurezas se encuentra en el líquido y no en los vapores debido a que la volatilidad relativa o K' es siempre menor que la unidad. Estos valores pueden ser directamente proporcionales al grado alcohólico como son los ácidos, principalmente acético o inversamente proporcionales como el furfural.

Eliminación de impurezas híbridas.

Para las impurezas de este tipo se consideran la relación que existe entre la volatilidad relativa con la concentración alcohólica.

Primer caso: Impurezas para las cuales la VR o K' disminuye con la concentración alcohólica. Ejemplo alcoholes superiores como el alcohol amílico.

En presencia de bajas concentraciones de etanol se comportan como una impureza de cabeza, mientras que a concentraciones fuertes se comporta como impureza de cola.

Segundo caso: Impurezas para las cuales la volatilidad relativa aumenta con la concentración alcohólica. Ejemplo: Metanol.

Las impurezas de este tipo se comportan como productos de colas a concentraciones débiles y como productos de cabeza fuertes a concentraciones elevadas.

M. Barbet estableció un gráfico que da, bajo forma de curvas, valores de coeficientes de purificación (K') para las diversas impurezas estudiadas. El origen de las coordenadas está en el punto K' = 1, como se muestra en la figura 1.4.

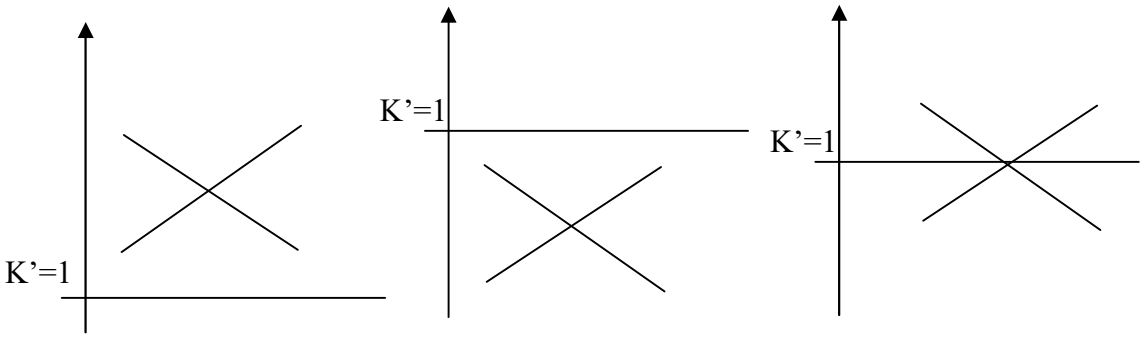


Figura 1.4 Gráfico de M.Barbet.

Mientras sea K' > 1, los vapores son más ricos en impurezas que el líquido generador. Cuando K' = 1, las dos riquezas son idénticas y no se pueden eliminar por destilación, cuando K'< 1, la impureza se concentra en el líquido.

Las impurezas de cabezas corresponden a las representadas por las curvas, las de colas a través de las curvas y mientras que las híbridas se representan por las curvas.

En el estudio del proceso de purificación de alcohol es necesario separar impurezas de todas las clases mencionadas en este epígrafe , pero que al estar presentes todas en las mezclas alcohólicas pueden afectar estos coeficientes reportados por M.Barbet y otros autores por lo que si se quieren recuperar por ser consideradas como productos de alto valor agregado es imprescindible un estudio de estas, sobre todo cuando este proceso revitalizaría el desarrollo de la industria alcoquímica en Cuba, y crearía nuevas fuentes de exportación y mercado, una de estas impurezas es el acetato de etilo considerado como una impureza de cabeza y los aceites de fusel (Campa, 1996).

1.3.2 Sistemas auxiliares para el proceso de rectificación de alcohol.

Sistemas auxiliares son aquellos aditamentos que aumentan la eficiencia de un equipo o proceso, procedimientos mediante los cuales se favorece la marcha eficiente de un proceso químico cualquiera, aunque puede funcionar sin ellos en algunos casos. Estos procesos o procedimientos constan de diferentes equipos donde están presentes las diversas operaciones unitarias.

<u>Podemos decir que los de sistemas auxiliares pueden ser:</u>

- Aislamiento de sistemas y refractarios.
- Generación de vapor.
- Tratamiento de agua y residuales.

- Calentamiento.
- Enfriamiento.
- Acondicionamiento de aire.
- Cogeneración (energía total).
- Sistema de transporte de fluidos (vacío, aire, agua).
- Electricidad.
- Otros sistemas.

Existen sistemas auxiliares en las columnas de destilación que son tan importantes como éstas por la función que realizan y por las dificultades de su diseño, así como la importancia que tienen en el cálculo de consumo de combustible en la operación (Treybal, 1985).

Tratamiento de aguas residuales:

La mayoría de industrias generan en sus procesos productivos, aguas residuales que deben ser tratadas para dar cumplimiento a los límites de vertido que les son de aplicación, de acuerdo con la normativa vigente. Esto implica la implementación de protocolos complejos y actuaciones técnicas que a menudo requieren la intervención de especialistas (Zapata and Galvis, 2013).

Tratamientos de aguas residuales:

Pretratamientos: Debe realizarse por medio de procesos físicos y mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas negras y que pueda interferir los procesos de tratamiento. Las principales estructuras que se deben dimensionar son:

•Rejillas • Remoción de grasas • Desarenadores

Tratamiento primario: pueden ser físicos o físicos-químicos y se realizan en tanques de sedimentación para remover parte de los contaminantes y retirarlos como lodos en el fondo de los tanques.

Tratamiento secundario: es esencialmente biológico, en esta etapa las bacterias benéficas se emplean intencionalmente para consumir otra parte de contaminantes, que no fueron removidos en el tratamiento primario.

- Procesos de lodos activados.
- Lagunas aireadas.

- Filtros percoladores.
- Lagunas de estabilización.

Tratamiento anaerobio: es el proceso de degradación de la materia orgánica por la acción coordinada de microorganismos, en ausencia de oxígeno u otros agentes oxidantes fuertes.

- Lagunas de oxidación o estabilización.

Tratamientos avanzados: Luego de los tratamientos anteriores, se ha logrado eliminar el 85 % de los contaminantes de las aguas residuales y queda por eliminar los nutrientes que favorecen el crecimiento de la flora acuática.

Filtración: A través de materiales granulares de diversos tipos y tamaños tales como arena fina y carbón.

Desinfección: Es la etapa final en la que se utilizan productos químicos como el cloro (Becerra and Gutierrez, 2013).

Torre de enfriamiento:

Una torre de enfriamiento es una máquina térmica utilizada para enfriar agua, mediante la evaporación de un pequeño porcentaje de la misma agua que se enfría (enfriamiento evaporativo). Dicha evaporación se estimula con una corriente de aire y con la atomización del agua recirculada.

Funcionamiento:

En las torres de enfriamiento se consiguen disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de enfriamiento mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre. A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un entramado denominado “relleno”. El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma, se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico. Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una cesión de calor del agua hacia el aire. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (evaporación). Esta masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido. La diferencia de temperaturas del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama acercamiento o

aproximación, ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua.

Para crear flujo hacia arriba, algunas torres de enfriamiento contienen aspas en la parte superior, las cuales son similares a las de un ventilador. Estas aspas generan un flujo de aire ascendente hacia la parte interior de la torre de enfriamiento. El agua cae en un recipiente y se retraerá desde ahí para al proceso de producción (Zavaleta, 2007).

Tipos de torres de enfriamiento:

Las torres de enfriamiento se clasifican según la forma de suministro de aire en:

- Torres de circulación natural:
  - Atmosféricas.
  - Tiro natural.
- Torres de tiro mecánico:
  - Tiro inducido.
  - Tiro forzado.
  - Otros tipos: Torres de flujo cruzado.

Dada la importancia del vapor como una de las corrientes principales del proceso de destilación de alcohol, se profundiza en los próximos epígrafes sobre este sistema auxiliar.

1.4 Generación de vapor. Consideraciones generales.

Antes de proceder a la descripción de los generadores de vapor, es importante hacer referencia a qué entendemos por caldera.

Caldera:

Una caldera es un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua, mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica.

Generador de vapor:

Se llama así al conjunto o sistema formado por una caldera y sus accesorios.

En la práctica se habla de “calderas” refiriéndose a todo el conjunto o “generador de vapor”. Por tal razón, en adelante, usaremos indistintamente ambos términos (Nuñez, 2015).

Las calderas o generadores de vapor son dispositivos cuyo objetivo es:

- Generar agua caliente para calefacción y uso general.
- Generar vapor para plantas de fuerza, procesos industriales o calefacción.

Funcionamiento:

Funcionan mediante la transferencia de calor, producido generalmente al quemarse un combustible, al que se le entrega agua contenida o que circula dentro de un recipiente metálico.

En toda caldera se distinguen dos zonas importantes:

a) Zona de liberación de calor o cámara de combustión: Es el lugar donde se quema el combustible. Puede ser interior o exterior con respecto al recipiente metálico.

Está parcialmente rodeado o sin paredes refrigeradas por agua. La transferencia de calor en esta zona se realiza principalmente por radiación (llama-agua).

b) Zona de tubos: Es la zona donde los productos de la combustión (gases o humos) transfieren calor al agua principalmente por convección (gases-agua). Está constituida por tubos dentro de los cuales pueden circular los humos o el agua (Abarca, 2016).

La estructura real de una caldera dependerá del tipo, no obstante, de forma general podemos describir las siguientes partes:

Estructura:

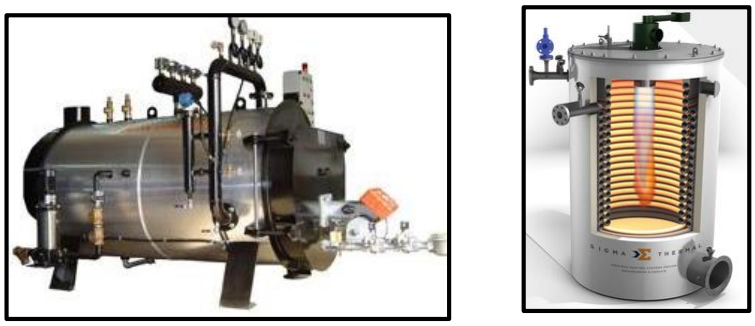
- Quemador: sirve para quemar el combustible.
- Hogar: alberga el quemador en su interior y aquí se realiza la combustión del combustible utilizado y la generación de los gases calientes.
- Tubos de intercambio de calor: el flujo de calor desde los gases hasta el agua se efectúa a través de su superficie. También en ella se generan las burbujas de vapor.
- Separador líquido-vapor: es necesario para separar las gotas de agua líquida con los gases aún calientes, antes de alimentarla a la caldera.
- Chimenea: es la vía de escape de los humos y gases de combustión después de haber cedido calor al fluido.
- Carcasa: contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio de calor (Varona, 2014).

1.4.1 Diferentes tipos de generadores de vapor.

Entre las clases de generadores de vapor tenemos aquel que se presenta en forma:

Horizontal: Este tipo de generador lo que hace es absorber el calor del refrigerante primario por la sustancia que se encuentra en un segundo circuito. Para que el refrigerante pueda acceder al generador de vapor horizontal debe haber una puerta o un colector de entrada que haga posible el acceso.

Una vez allí, lo que se lleva a cabo es la distribución de la superficie de transferencia. Dicha superficie permite, a través de un equipamiento de tubos, que la sustancia pueda realizar movimientos para que se facilite su proceso de calentamiento. Y así como hay un colector de entrada, también hay un colector de salida, por donde sale el elemento refrigerante. En este tipo de generador horizontal lo que se produce es un vapor con alto contenido de humedad. Pero a pesar de esto, la humedad puede ser reducida por las instalaciones encargadas del secado, que se encuentran dentro del generador mismo.



a) **b)**

Figura 1.5 Tipos de generadores de vapor: a) Horizontal b) Vertical.

Vertical: se constituyen de un solo elemento donde se produce el vapor y se suscita la separación de la humedad. Es posible encontrar un sistema de circulación de índole natural, aunque se necesita un cálculo previo del circuito, algo que no se requería en el generador de vapor horizontal. En este modelo, el proceso de circulación se da a partir de la convección que surge cuando la ebullición se da en grandes proporciones (Nuñez, 2015).

1.4.2 Principales combustibles y características fundamentales.

Llamamos combustible a cualquier tipo de material o producto que tenga la capacidad de liberar energía cuando se oxida de forma violenta, que tiene como consecuencia el desprendimiento de calor. Supone la liberación de energía de su forma potencial (energía de enlace) a una forma utilizable sea directamente (energía térmica) o energía mecánica (motores térmicos) dejando como residuo calor (energía térmica), dióxido de carbono y algún otro compuesto químico (Ecured, 2016).

El combustible es un material cuya quema es utilizada para producir calor, energía o luz. La quema o combustión es una reacción química en la cual los constituyentes del combustible se combinan con oxígeno del aire. Para iniciar la quema de un combustible es necesario el alcance a una temperatura definida, llamada temperatura de ignición (Wikipedia, 2017).

Combustibles fósiles:

Los combustibles fósiles se formaron hace millones de años a partir de restos orgánicos de plantas y animales muertos. Las reacciones químicas de descomposición y la presión ejercida por el peso de esas capas durante millones de años, transformaron esos restos orgánicos en lo que ahora conocemos como combustibles fósiles. Son recursos no renovables, o mejor dicho, son renovables, pero harían falta millones de años para su renovación, y en algún momento, se acabarán. Por el contrario, otros combustibles, como la madera solamente requieren años para su renovación.

Químicamente, los combustibles fósiles son mezclas de compuestos orgánicos mineralizados que se extraen del subsuelo con el objetivo de producir energía por combustión. Se consideran combustibles fósiles al carbón, procedente de la madera de bosques del periodo carbonífero, el petróleo y el gas natural, procedentes de otros organismos.

Entre los combustibles fósiles más utilizados se encuentran los derivados del petróleo: gasolinas, naftas, gasóleo, fuelóleo; los gases procedentes del petróleo (GLP): butano, propano, el gas natural, y las diversas variedades del carbón: turba, hullas, lignitos, etc. (Ordóñez, 2014).

Biocombustibles:

Los llamados biocombustibles (un tanto impropiamente porque los combustibles fósiles también proceden de materia orgánica, materia viva, fosilizada), son sustancias procedentes del reino vegetal, que pueden utilizarse como combustible, bien directamente, o tras una transformación por medios químicos (Wikipedia, 2017).

Entre ellos se encuentra:

Sólidos: aprovechamiento de materias sólidas agrícolas, madera o restos de otros procesos, como cáscaras no aprovechables de frutos, que se aglomeran en pellas combustibles.

Líquidos: en general procedentes de transformaciones químicas de ciertas materias orgánicas, como el bioalcohol o el biodiesel.

Gaseosos: como el llamado biogás, que es el residuo natural de la putrefacción de organismo vivos en atmósfera controlada y que está compuesto de metano y dióxido de carbono a partes más o menos iguales.

En general, los combustibles utilizados normalmente son el carbón o derivados del carbono (hidrocarburos, derivados de la madera, que también tienen carbono, e incluso los hidratos

de carbono de la alimentación humana) por lo que en los procesos de combustión se produce el gas dióxido de carbono que contribuye al efecto invernadero y el consiguiente calentamiento global. Además, especialmente los combustibles sólidos, producen hollín y cenizas volantes que ensucian el aire del lugar donde se emiten.

Principales tipos de combustibles:

Carbón: El carbón es un mineral que se origina a partir de restos vegetales descompuestos, que por la acumulación en zonas pantanosas, lacustres, y marinas de profundidad leve, sufrieron cambios químicos propiciados por la presión y el calor.

Antracita: Se trata de un mineral de origen vegetal al igual que el carbón, se forma en lugares en los que la temperatura térmica constante oscila entre los 170 y 250 °C. Es un mineral fósil que suele ser escaso a comparación de otros combustibles fósiles como el carbón, el coque o la hulla.

Coque: El carbón de coque es el resultado de la destilación o pérdida de líquido del carbón con betún o carbón bituminoso se suele usar industrialmente y para la calefacción y otros usos domésticos.

Hulla: Se trata de otro combustible mineral de origen orgánico, cuya cantidad de carbono oscila entre un 45 y un 85 % de carbono, se divide en tres tipos que son la hulla grasa o aceitosa, la semi-seca y la seca.

Gas natural: Este es un combustible fósil gaseoso, cuya composición principal es la del gas metano. Es el producto de la descomposición de cadáveres de los seres vivos que se acumula bajo tierra.

Gas licuado de petróleo: Es mezcla de los gases butano y propano que se obtienen tras procesos de refinamiento del petróleo o de la extracción y refinamiento del gas natural.

Petróleo: Es un líquido compuesto perteneciente a los hidrocarburos. Es uno de los principales combustibles fósiles y uno de los más utilizados actualmente tanto para uso industrial como para otros usos (como combustible para vehículos de transportes, calefacción, producción de electricidad, uso doméstico, etc.). Del petróleo se derivan otros combustibles cuya composición química particular cambia, es el caso de la gasolina, el diésel, la nafta, el fuel oíl, el kerosén y otros, mismos a los que se les dan variados usos, en especial en distintos motores de vehículos (terrestres, acuáticos y aéreos).

Gasolina: Se trata de una mezcla líquida de hidrocarburos derivados del petróleo que se usa principalmente como combustible para coches, motocicletas, camiones, autobuses y otros vehículos similares. Los tipos de gasolinas existentes varían tanto en la cantidad de octanos que poseen, como en algunas sustancias utilizadas para aumentar dicha cantidad de octanos.
Diésel: Es otro hidrocarburo derivado del petróleo, sus moléculas son más pesadas que el kerosén y las gasolinas, se le utiliza en máquinas de compresión-descompresión como vehículos pesados.
Hidrógeno: El hidrógeno es un elemento que en estado puro funciona como combustible y que en la naturaleza se halla comúnmente combinado con otros elementos. Se almacena a bajas temperaturas para que conserve el estado líquido y en embaces resistentes a la alta presión (tanque). Es un combustible que no contamina.
Combustibles nucleares: Se trata de materiales que pueden ser utilizados para la producción de energía nuclear, ya sea por el método de la fusión nuclear o por el de la fisión nuclear. Algunos de ellos son radio, el uranio (dióxido de uranio en polvo), el tritio, el deuterio, y el plutonio.
Combustibles orgánicos: En el caso de los seres vivos, existen algunos elementos que pueden considerarse como combustibles gracias a que proporcionan energía para el movimiento de los músculos. En este caso podemos hablar de los carbohidratos, los lípidos y las proteínas (Ordóñez, 2014).

1.5 Análisis Complejo de Procesos en la industria (ACP).

El Análisis Complejo de Procesos surge como una metodología que abre nuevos caminos en la intensificación de procesos y en su propio desarrollo se ha convertido en un problema cardinal de la ciencia contemporánea al cumplir el doble requisito de: constituir un resultado al desarrollo científico reciente y un requerimiento del necesario perfeccionamiento de la eficiencia técnico-económica de los procesos de la industria química. Consiste en un amplio análisis científico-técnico y técnico-económico de un proceso existente o concebido, en lo referente a las posibilidades de realización óptimo de los objetivos previstos. El Análisis Complejo de Procesos es un aporte a la intensificación de la utilización de las instalaciones de la industria de procesos químicos elevando su productividad.
La complejidad del Análisis Complejo de Procesos consiste ante todo en: la inclusión de varias secciones, elementos y etapas o fases del proceso de producción, incluyendo el

proceso principal correspondiente y los procesos auxiliares y secundarios decisivos para su efectividad, descubrimiento y aprovechamiento de efectos del sistema para la intensificación, la magnitud relativamente grande de los objetivos a que se aspira cada vez y los resultados realmente logrados, la aplicación del análisis mediante comparaciones (a nivel mundial, del servicio, de valores óptimos o teóricos con valores reales, etcétera), mediante la derivación y determinación efectiva del plan de medidas para la comprobación de los resultados (Suárez and Olazábal, 2012).

La intensificación de la producción mediante el Análisis Complejo de Procesos, requiere la elaboración de objetivos económicos en cada industria de forma concreta, entre lo que se encuentra de acuerdo con la experiencia acumulada: aumento de la calidad y la cantidad de los productos elaborados, disminución de los consumos específicos y absolutos de materiales y energía, mejoramiento de las condiciones de trabajo, ahorro de fuerza de trabajo, disminución de la contaminación ambiental.

Estrategia general para la ejecución del Análisis Complejo de Procesos:

1- Formulación del problema, establecimiento de objetivos y criterios para intensificar el proceso.
2- Inspección preliminar y clasificación del proceso con el fin de descomponerlo en subsistemas.
3- Determinación preliminar de las relaciones entre los subsistemas.
4- Análisis de las variables y relaciones para obtener un conjunto tan sencillo y consistente como sea posible.
5- Establecimiento de un modelo de las relaciones en función de las variables y parámetros que inciden y caracterizan los subsistemas y el sistema global.
6- Evaluación y aplicación de la calidad con que el modelo representa el proceso real (Suárez et al., 2007).

En específico, la destilación representa una operación muy importante en la industria ya que a través de ella se logran separaciones elevadas en eficiencia. La optimización de torres de destilación se hace sobre la base de la relación de reflujo, como se aprecia los costos mayores de este proceso están dados por los costos de operación (cargas de calor y enfriamiento) pues la destilación es intensiva y altamente energética, si se quiere hacer más eficiente la operación

hay que mejorar la eficiencia energética de la misma, por esa razón se han realizado muchos esfuerzos para reducir el consumo de energía y optimizar la destilación.

Métodos de optimización han incluido el resecuenciamiento de redes de destilación, integración de calor entre las columnas, la recompresión de vapor, y el uso de torres complejas. En cada una de esas alternativas el objetivo principal es reducir el costo total de la destilación y el costo de operación debido a que los costos energéticos son altos, de esta forma se ha logrado ahorrar de un 3-10 % de energía.

1.5.1 Simulación de procesos como herramienta para el ACP.

La sociedad actual está en constante transformación por la irrupción y difusión de las nuevas tecnologías en todos los ámbitos. A este proceso de cambio continuo se ha ido adaptando el sector industrial, que en las últimas décadas ha evolucionado hacia espacios empresariales más abiertos, dinámicos, y competitivos en los que se cuestionan y cambian constantemente los planteamientos tradicionales.

Por tal motivo, se plantea la Simulación de Procesos como una herramienta que permite vislumbrar de antemano el impacto de estas técnicas a través de una “visión” futura, altamente precisa y cuantificada. La simulación de procesos es una de las más innovadoras herramientas empleadas actualmente en ingeniería para el análisis de áreas productivas. Es utilizada normalmente para representar un proceso real mediante otro mucho más simple y entendible. La necesidad de su utilización depende del grado de complejidad de los procesos dados por la misma organización.

La aplicación de las técnicas de simulación a los procesos de fabricación está irrumpiendo con fuerza permitiendo a las empresas disfrutar de los beneficios de la "Fabricación Virtual".

<u>Con estas aplicaciones se pueden conseguir:</u>

1- Reducción de los plazos de entrega al poder solapar actividades.
2- Disminución de los costes de desarrollo. Las correcciones del producto y los cambios de ingeniería cuestan diez veces menos si se ejecutan durante la fase de diseño.
3- Aumento de la calidad y fiabilidad del diseño. La simulación permite, a bajo costo, ensayar un sinfín de posibles escenarios y escoger las mejores soluciones en cada momento.
4- Seleccionar la maquinaria más adecuada a cada proceso.
5- Optimizar el diseño de todos los componentes.

6- Evaluar las mejores alternativas de montaje y mantenimiento.

7- Evaluar el flujo de materiales para optimizar los recursos productivos.

Como ventajas que aporta la simulación de procesos industriales a los trabajos de ingeniería se puede encontrar que:

- Es un sistema cómodo y sencillo para estudiar sistemas complejos.
- Se pueden controlar mejor las diferentes acciones a tomar que en la realidad.
- Representa la incertidumbre dentro del sistema.
- Los tiempos de análisis son reducidos.
- El sistema real no es interrumpido para el análisis de los cambios propuestos.

Hemos de tener en cuenta que un modelo de simulación se aproxima a la realidad en un porcentaje cercano al 100%, por lo tanto no se puede llegar a reproducir exactamente la realidad debido al sobrecoste que esto supondría tanto en tiempo dedicado, como en los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto (Forte, 2005).

Las tres empresas que se reparten casi la totalidad del mercado de la simulación de procesos son AspenTech, Honeywell y Simulation Sciences. Puede considerarse la tarea de simulación, como aquella en la cual se proponen ciertos valores de entrada al simulador o programa de simulación, para obtener ciertos resultados o valores de salida, de forma tal que el comportamiento del sistema real bajo dichas condiciones pueda ser descrito y analizado. La simulación de procesos usa relaciones físicas fundamentales como balances de masa y energía, relaciones de equilibrio y correlaciones de velocidad (Reacción , transferencia de masa y calor) y predice flujos, composiciones y propiedades de las corrientes, condiciones de operación y tamaño de equipo (Domínguez, 2009).

La simulación es una herramienta básica en la ingeniería de procesos, la cual permite interpretar los flujos, localizar los problemas de funcionamiento y predecir comportamientos. El centro del análisis es el modelo matemático, partiendo de la selección de las ecuaciones que relacionan las variables del proceso tales como la temperatura, presión, flujos y composiciones, área superficial, configuraciones geométricas entre otras condiciones. La figura 1.6 muestra de manera general la clasificación y las aplicaciones de la simulación de procesos (Roche, 1988).

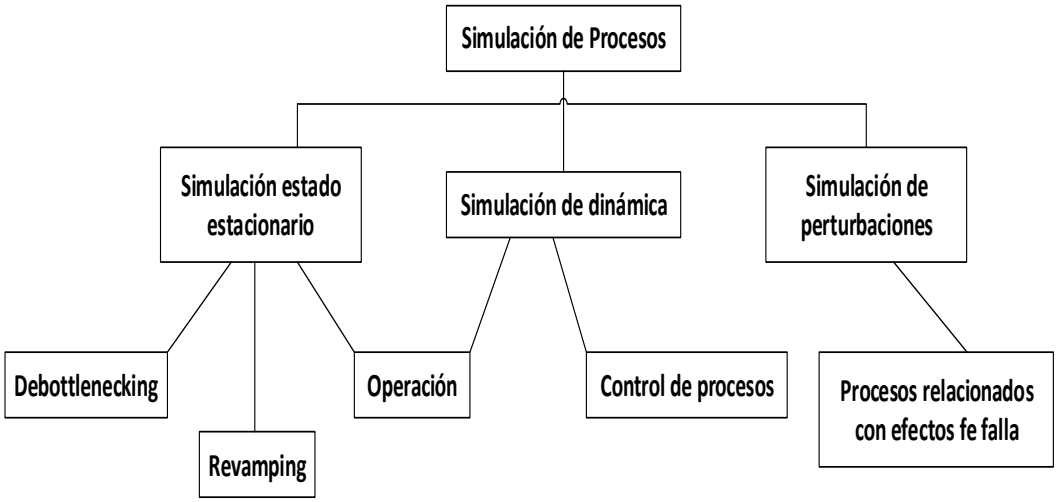


Figura 1.6 Clasificación y aplicaciones del proceso de Simulación.

Un modelo se puede definir como una representación simplificada de un sistema real, un proceso o una teoría, con el que se pretende aumentar su composición, hacer predicciones y ayudar a controlar el sistema de equipos. Los bancos de datos contienen información acerca de constantes y propiedades termo físicas y de transporte para muchas sustancias, equipos, medidas de beneficio, costo de operación y capital. La mayoría de los procesos involucran equipos convencionales como son, intercambiadores de calor, bombas, columnas de destilación, absolvedores, entre otros. Para estas unidades, las ecuaciones no difieren entre los procesos químicos. Las propiedades físicas y termodinámicas y las constantes cinéticas químicas difieren, pero no las ecuaciones. Los simuladores en estado estacionario, dinámico y batch son usados comúnmente y se han extendido en la práctica industrial. A continuación, se enuncian los más utilizados en la industria: Aspen Plus, HYSYS, CHEMCAD, DINAPLUS, Batch Puls y SUPERPRO DESIGNER. Estos permiten acceder a muchas propiedades físicas, equipos, modelos de dimensionamiento, operación y bases de datos de costos. Por su gran aplicación y fiabilidad muchas veces estos simuladores sustituyen experimentos a escala piloto jugando un rol complementario ahorrando recursos y tiempo (Domínguez, 2009).

Precisamente, en el trabajo se utilizará como herramienta de cálculo, la simulación de procesos, con ayuda del software Aspen Plus, para el proceso de rectificación de alcohol fino y los sistemas auxiliares, fundamentalmente el sistema de generación de vapor, de manera

que permita el estudio y comportamiento de las diferentes variables, composiciones, balances de masa y energía, así como el diseño de los equipos del proceso.

CAPITULO 2. ANÁLISIS DEL PROCESO EN LA PLANTA DE RECTIFICACIÓN DE ALCOHOL.

2.1 Metodología para el Análisis Complejo del Proceso de rectificación de alcohol.

Si bien en la Corporación Cuba Ron S.A, se ha ganado conciencia en cuanto a la importancia de la innovación tecnológica y de su decisiva importancia para el desarrollo, eficiencia y permanencia de sus empresas, resulta todavía insuficiente, en términos generales, los resultados relacionados con la innovación tecnológica que se obtienen y generalizan anualmente, en los que influyen, entre otros factores, la escasa experiencia existente sobre los procesos tecnológicos y de innovación.

Es por ello que se puede afirmar que el sector no cuenta aún con una metodología que le permita diagnosticar y evaluar sus procesos tecnológicos, para analizar los factores que inciden en su desarrollo, así como, efectuar una adecuada vigilancia del entorno tecnológico que posibilite descubrir oportunidades para mejorarlos. Por otra parte, elaborar un plan de desarrollo tecnológico que, estando en correspondencia con los objetivos estratégicos de la organización, le permita buscar vías pertinentes para enriquecer su patrimonio tecnológico y proteger sus productos, conocimientos y tecnologías.

Con el objetivo de seguir profundizando en la aplicación del Análisis Complejo de Procesos la Corporación Cuba Ron S.A, en aras de fortalecer el desarrollo tecnológico, se mantiene trabajando y desarrollando acciones encaminadas para las mejoras tecnológicas en sus instalaciones y procesos.

La intensificación de la producción mediante esta herramienta, requiere la elaboración de objetivos económicos de manera concreta, toda vez que permitan incrementar la calidad y la cantidad de los productos elaborados, la eficiencia y estabilidad en las producciones, con una disminución de los consumos de materiales, energía y de la contaminación ambiental.

Para ello, se continuará validando la metodología propuesta por (Pedro, 2016, Osmany, 2017), la cual permitirá dirigir el camino hacia la gestión de la innovación con el fortalecimiento de su patrimonio tecnológico. En este caso en la Destilería anexa a la Ronera Central.

<u>La metodología tiene como aspectos principales a tener en cuenta:</u>

1- Diagnóstico integral del proceso de producción

2- Caracterización de las materias primas, productos finales e intermedios.
3- Identificación de los puntos débiles del proceso
4- Propuestas de alternativas tecnológicas.
5- Selección y evaluación técnica de las alternativas tecnológicas
6- Evaluación económica de las alternativas.

2.2 Caso de estudio.

La destilería ´´Agustín Rodríguez Mena´´ cuenta con una producción diaria de alcohol etílico fino de 30 200 l/día. La materia prima utilizada es el Alcohol Técnico B (flema), la cual debe cumplir la norma cubana (NC-792, 2015).

Previamente se le determina el grado alcohólico y el tiempo de permanganato, en el caso de este último análisis se realiza por contrato con el cliente, y luego es bombeado hacia los tanques de almacén.

Descripción general del proceso:

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo del proceso de rectificación de alcohol. El alcohol etílico flema cuando se entrega a producción es bombeado para el tanque de proceso. El mismo se alimenta a la columna hidroselectora por el plato 19 a razón de 26-29 l/min y se adiciona un flujo de agua de dilución (agua de Lutero) de 60-75 l/min. El objetivo que se persigue en esta columna es lavar el alcohol, mediante la adición de agua, arrastrando por diferencias de volatilidades las impurezas de la mezcla alcohólica, eliminando toda la acidez y parte de los aceites fusel que venían de la destilación, reduciendo el porcentaje de alcohol de mal gusto. En ella tiene efecto la separación de la mayor parte de los productos de cabezas y en algunos casos de color también. Por la parte superior de esta columna se extrae a una temperatura entre 79-84 ^{o}C una mezcla de vapores compuesta por alcohol y compuestos volátiles (aldehídos, ésteres y otros compuestos orgánicos), estos gases se condensan en una batería de condensadores, parte de este condensado es desviado e introducido por el último plato de la columna hidroselectora, el resto se envía al tanque de alcohol D a una razón de 0,4 l/min como mínimo. En esta columna se realiza una extracción de fusel en los primeros platos y de ahí es enviado al tanque de recolección.

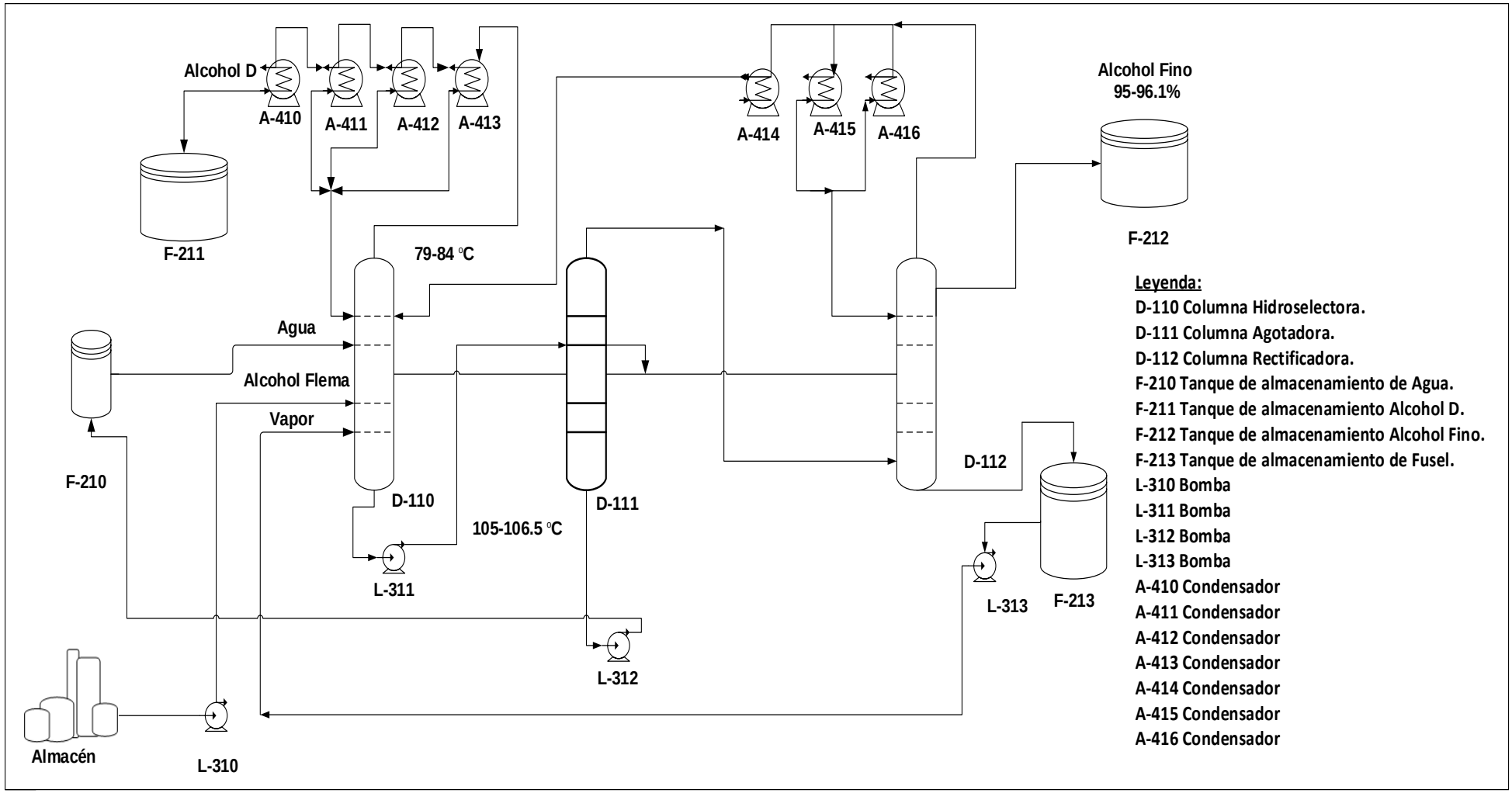


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de obtención de Alcohol Etílico Fino A.

La flema disuelta se bombea hacia la columna agotadora, siendo esta el fondo de la columna rectificadora, estando separada en dos partes debido altura que presentaba la misma. La columna agotadora es la encargada de eliminar productos de cola y casi toda el agua, tiene la posibilidad de realizar extracciones de fusel si fuera necesario, siendo enviadas al tanque de recolección. Por la parte inferior de la columna se extrae un residual a las temperaturas de 105-106,5 °C, que se utiliza como alimentación de agua de Lutero a la columna hidroselectora, y el excedente pasa a la caldera como agua de alimentación.

Los vapores alcohólico pasan del tope de la columna agotadora a la columna rectificadora, en la misma se pretende alcanzar el grado alcohólico deseado y eliminar las trazas de ésteres, aldehídos y alcoholes superiores de la corriente de la columna hidroselectora. En la paila de la columna rectificadora se realizan extracciones de alcoholes superiores, así como en los platos 13 y 15, estas dos extracciones se pasan al tanque de recolección de fusel.

Por la parte superior de la columna rectificadora se extrae una mezcla de gases, siendo enviada a tres condensadores; parte de este condensado es retornado a la columna rectificadora, y la otra parte del condensado (volátiles) se envía a la columna hidroselectora a razón de 0,4 l/min como mínimo. De los platos 42 al 45 de la columna rectificadora se extrae alcohol etílico fino con una concentración de 95,5-96,1 % vol. a razón de 18-25 l/min.

En este momento la columna recuperadora está paralizado producto a que el primer condensador de la misma está en muy mal estado y no se ha podido reparar, además existen problemas constructivos en la columna, por lo que todo el fusel se está pasando directamente a la columna hidroselectora.

2.2.1 Parámetros de control del proceso de rectificación de alcohol.

A continuación, se muestran en la tabla 2.1, 2.2, y 2.3 los parámetros de control del proceso de rectificación de alcohol distribuidos en cada una de las columnas que componen el mismo, en la tabla 2.4 se muestra las especificaciones de salida de los productos finales.

Tabla 2.1. Parámetros de control del proceso en la Columna Hidroselectora.

No.	Características	M. Ensayo	Especificaciones
1	Presión en la paila	Visual.	0-55,8 kPa.
2	Temperatura en el tope	Visual.	77-84 °C.
3	Temperatura en la paila	Visual.	85 °C mínimo

4	Grado alcohólico del pase	NC 292:2007	16-40 % Alc. Vol.
5	Flujo de alcohol de alimentación	Visual.	14-30 L/ min.
6	Flujo de agua de alimentación	Visual.	20-70 L/ min.
7	Flujo de extracción de volátiles del 4to condensador	Visual.	0,4 L/ min. mínimo
8	Temperatura zona de concentración	Visual.	82-98 °C.
9	Temperatura reflujo	Visual.	60-75°C.
10	Grado alcohólico de la extracción de volátiles del 4to condensador	NC 292:2015	93-96,4 % Alc. Vol.
11	Flujo de extracción de fusel	Visual.	0,5 L/ min. mínimo

Tabla 2.2. Parámetros de control del proceso en la Columna Rectificadora.

No.	Características	M. Ensayo	Especificaciones
1	Temperatura en la paila	Visual.	80-98 °C.
2	Grado alcohólico del pase	Ebullómetro	10-40 % Alc. Vol.
3	Temperatura en el tope	Visual.	70-83 °C.
4	Temperatura en el Plato 15	Visual.	82-86 °C
5	Flujo de extracción de fusel	Visual	1 L/ min. mínimo
6	Flujo de extracción de volátiles del tercer condensador.	Visual	0,4 L/ min. mínimo
7	Grado alcohólico de la extracción de volátiles del 2do condensador	NC 290:2007	95,6 % Alc.Vol. mínimo
8	Flujo de alcohol etílico fino	Visual	0-25 L/ min.
9	Grado alcohólico del alcohol etílico fino	NC 290:2007	95,5 % Alc.Vol. mínimo
10	Tiempo de permanganato del alcohol etílico fino	NC 706:2010	30 minutos. mínimo
11	Acidez Total del alcohol etílico fino	NC 291:2011	15 mg/L de alcohol a 100. (máximo)

Tabla 2.3. Parámetros de control del proceso en la Columna Agotadora.

No.	Características	M. Ensayo	Especificaciones
1	Presión en la Paila.	Visual	0-48,3 kPa.
2	Temperatura en la Paila	Visual	105-107 °C.
3	Pérdida en residuales	Ebullómetro	0 % Alc. Vol.
4	Presión en el tope	Visual	17,9-27,6 kPa.

Tabla 2.4. Especificaciones de salida de los productos finales.

Alcohol Etílico Fino	
Grado	95,5 ºGL mínimo
Acidez total	15 mg/L a.a.
Tiempo de KmnO4	30 minutos. mínimo
Aldehídos superiores	55 mg/ L a.a. máximo
Olor, sabor y aspecto	característicos
Alcohol D	
Grado	85 °GL mínimo

2.3 Diagnóstico Integral en el proceso de rectificación de alcohol.

2.3.1 Materias primas. Características.

La materia prima fundamental es el Alcohol Técnico B (flema), proveniente de diferentes entidades comercializadas por TECNOAZUCAR, siendo los principales suministradores el central Antonio Guiteras, Amancio Rodríguez, Heriberto Duquezne y Melanio Hernández.

Esta variedad de suministradores se ha convertido en un problema para la destilería al no existir semejanza en las características de la materia prima, cambiando el sistema operacional, con dificultades en la eliminación de las impurezas.

Según la norma (NC-792, 2015) se plantea que el Alcohol Técnico B (flema), solamente se le exige el grado alcohólico y el tiempo de permanganato, siendo de 93 % Vol. como mínimo, respectivamente. En cuanto a la suma de los alcoholes superiores, no se reportan los valores permisibles para este tipo de alcohol, sin embargo, estos reportes son importantes para el tratamiento posterior de la materia prima.

Por tal motivo, en la entidad, se realizan análisis cromatográfico a las distintas muestras que se recepcionan para tener criterio de análisis una vez que se obtiene el producto final.

A continuación se muestran, en la tabla 2.5 los resultados del análisis de diferentes muestras reportado por el laboratorio de la Universidad Martha Abreu de las Villas. Como se puede observar, las composiciones varían y muestran valores elevados, sobre todo para el n-propanol e isobutanol, para las muestras de los suministradores Amancio Rodríguez y Antonio Guiteras. La eliminación de estas impurezas crea inestabilidad en el sistema operacional requiriendo así, mayor tiempo para la recirculación y rectificación del alcohol.

Tabla 2.5. Resultados de la cromatografía de las diferentes destilerías suministradoras de la materia prima. Concentración (mg/la.a).

Suministrador	Grado	Tiempo de KmnO4	Ac. Aldehído	Ac. etilo	Metanol	N propanol	Iso Butanol	Iso Amílico
Amancio Rodríguez	94,5	3 min	128,4	60,8	12,7	556,4	290,7	0,00
Antonio Guiteras	95,9	25 min	28,25	49,72	18,39	367,9	234,4	0,00
Melanio Hernández	95,8	23 min	10,97	71,8	30,46	48,51	15,57	10,93
Heriberto Duquesne	94,0	1 min	144,5	97,9	27,9	114,4	37,7	27,2

Principales problemas detectados:

1- Incumplimiento del índice de flema, cuando se trabaja con alcoholes, flemas que contienen impurezas terciarias que no reaccionan con el permanganato, debido a que el proceso tecnológico no está preparado para procesar todo tipo de alcoholes al tener la columna recuperadora fuera de servicio.
2- Proceso tecnológico incompleto, no se cuenta con tecnología para la Destilación de aguardiente.
3- Falta instalación de vapor a la salmuera.
4- Pocas veletas, ventiladores en mal estado.
5- Exceso de gasto de electricidad de bombas de agua a condensadores.
6- No aprovechamiento del agua procedente de la destilación en un sistema cerrado.
7- Tanques en mal estado (Alcohol D, Alcohol flema- Tk 13).
8- Inadecuado aislamiento térmico de tuberías de vapor y agua caliente para la destilería (187 m de tuberías sin aislar; 10 tanques e intercambiadores de calor sin aislamiento).
9- Generación de un subproducto "Alcohol D" que puede ser reutilizado.

Solución:

1- Reparación capital de la destilería.
2- Evaluación del rediseño de la columna y reactivación de la misma.
3- Adquisición de nueva Tecnología para Destilación de aguardiente.
4- Montar instalación de vapor a la salmuera.

5- Adquisición de las pacas plásticas para la torre de enfriamiento.
6- Montar el intercambiador de calor y tuberías de agua caliente de los condensadores.
7- Usar en forma de sistema cerrado el agua procedente de la destilación del alcohol lo que conlleva al establecimiento de nuevos parámetros de operación de la planta, reparar tanques.
8- Aislamiento térmico de tuberías de vapor y agua caliente para la Destilería.
9- Evaluar la posibilidad de reutilización del subproducto "Alcohol D".

El problema más importante que tiene la destilería en este momento es que al no tener la columna recuperadora, las impurezas están dando vueltas en el sistema y solo salen por el cuarto condensador de la columna hidroselectora y por el tercer condensador de la columna rectificadora, por lo que el tiempo de trabajo de la misma no debe exceder los dos meses consecutivos ya que comienza a bajar el tiempo de permanganato en el producto final.

Precisamente, una solución a esta discrepancia, es la propuesta de diseño de una columna recuperadora en el sistema de rectificación de alcohol.

2.4 Principales portadores energéticos y sistemas auxiliares.

Los principales portadores energéticos del proceso, son electricidad, vapor y combustible, que en este caso es el petróleo crudo cubano.

Petróleo Crudo:

El combustible crudo cubano PCNm1400 es suministrado a la planta por la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas, con previo análisis y caracterización físico-química del mismo. En el **Anexo 1** se muestran especificaciones del crudo cubano.

Para el caso de estudio, en la tabla 2.6 se observa la caracterización de una muestra del combustible crudo el cual tiene como promedio las siguientes características:

Tabla 2.6. Propiedades físicas y químicas del crudo cubano PCNm1400.

Parámetros	sin aditivos	Parámetros	sin aditivos
Valor Calórico Superior (Kcal/kg)	9746	Carbón Conradson % peso	12,8993
Valor Calórico Inferior (Kcal/kg)	9224	Asfaltenos % peso	12,4525
Densidad API	10,7	Cenizas % peso	0,0408
Gravedad Específica a 60 °F g/cm^3	0,9951	Vanadio ppm	87,924
Agua % peso	0,6	Viscosidad cSt a 50 °C	1142,64
Azufre % peso	6,31	Viscosidad cSt a 80 °C	216,89
Hidrógeno % peso	10,29	Punto de Inflamación 0 °C	35,2
Carbono % peso	81,80		

Según la caracterización, se puede observar como el crudo cubano, presenta elevados por cientos de azufre en el orden de los 6,31%, por encima del 3% según las normas, lo cual influye en la combustión del mismo, en la formación de cantidades altas de SO_2, contaminante que afecta la calidad del aire.

Sistemas Auxiliares.

Sistema de Tratamiento de Agua.

El sistema de tratamiento consiste en dos tanques de almacenamiento de agua dura, dos columnas de intercambio iónico y un tanque de almacenamiento de agua blanda. Las etapas fundamentales son, contralavado, regeneración y enjuague.

Primeramente, se hace un contralavado del agua dura, donde se revuelve la resina y se extrae toda el agua turbia, luego se suministra al filtro en sentido ascendente mediante una bomba a la presión de 1,5-2 atm. Una vez pasada a través del lecho de resina se descarga al canal mediante la válvula de salida, la cual está abierta de forma tal que garantice una velocidad del flujo de 9-13 m/h, en un tiempo de 12-15 min debiendo asegurarse el operador de que no exista pérdida del material, con el objetivo de extraer toda la suciedad que tenga.

La segunda etapa es la regeneración que consiste en la restauración de la actividad del material intercambiador, reemplazando los iones absorbidos durante la fase de agotamiento por los iones inicialmente presentes, lo cual se logra pasando una solución de salmuera. La solución regenerante se prepara con agua suave en otro tanque con un volumen de 2,3 m^3. La solución saturada en sal contenida en el tanque medidor previsto en el diseño de la planta, es pasada a este tanque en el cual se diluye con agua hasta obtener la concentración adecuada de 8-10 ^{o}Be.

La tercera etapa es el enjuague, donde se pasa una corriente de agua a través del lecho con el objeto de eliminar los residuos del regenerante y de los productos de la regeneración. Cuando la calidad del agua responde a las normas establecidas, se pone el suavizador en servicio o se deja de reserva, según la necesidad.

El agua debe ser suave sin contenidos de iones Ca^{2+} y Mg^{2+}, los cuales son sustituidos por cationes Na^{+} con una reducción de la dureza del agua desde 0,5 hasta 0,1 ppm. El agua suave es utilizada para la dilución en la arrancada, en las torres de enfriamiento y en la alimentación a la caldera.

Tabla 2.7. Datos técnicos del equipamiento del Sistema de Tratamiento de Agua.

Suavizadores	
País	Cuba
Año de puesta en marcha	1997
Modelo	48
Capacidad	11 m^3/h
Altura	1,25 m
Diámetro	2,95 m
Presión	3 Kg/cm^2
Consumo de sal (regenerante)	350 Kg
Volumen de resina	0,97 m^3
Estado Técnico	Regular

Sistema de Enfriamiento.

Se cuenta con una torre de enfriamiento de dos secciones, compuesta por una piscina que es llenada con agua suave, y un ventilador de tiro inducido. El agua caliente proveniente de los condensadores a las temperaturas de 45-46 ºC es bombeada, entrando por la parte superior de la torre, directamente a un moni flor que distribuye equitativamente por tubos y sale por los spray, para caer en un conjunto de pacas de relleno dispersándose por toda la superficie, de manera que se logre una disminución de la temperatura del agua para poder ser reutilizada como agua de enfriamiento en los condensadores.

Tabla 2.8. Datos técnicos de las torres de enfriamiento.

Torres de Enfriamiento	
Marca	TEVA
Modelo	TVA.208 SPL
País de Origen	España
Puesta en marcha	1999
Tipo	Goteo
Potencia Térmica a disipar	300 000 Kcal/h
Temperatura húmeda exterior	27 ºC
Temperatura de entrada	45 ºC
Temperatura de salida	30 ºC
Caudal de aire	185,220 m^3/h
Caudal de agua	200 000 L/h
Consumo de agua	5000 L/h
Estado Técnico	Bueno

Generación de Vapor.

El agua suave obtenida es almacenada y bombeada a la caldera, donde se une con el excedente de agua de Lutero proveniente del proceso de hidroselección, aumentando su temperatura, de manera que favorezca la eficiencia en la caldera.

El petróleo crudo es bombeado del tanque de almacenamiento al intercambiador de calor, calentando primeramente por resistencia y luego por vapor. El combustible reacciona con el aire y crea una combustión completa, permitiendo la generación de vapor saturado utilizado en las columnas de destilación.

La misma tiene buen estado técnico, con mantenimientos y reparaciones planificadas, tiene instalados los principales accesorios para el control de las variables, además de un sistema automatizado de control que permite trabajar con elevada eficiencia y eficacia.

Preparación técnica y conocimiento de la actividad que realizan. Los datos fundamentales de la fuente de emisión aparecen a continuación:

Tabla 2.9. Datos de la fuente de emisión.

Equipo	Horas de trabajo	Días de trabajo	Altura de la chimenea (m)	Diámetro interior de la chimenea a la salida (m)
Caldera	24 horas al día	31	25	0,9

Tabla 2.10. Datos característicos de la caldera.

Caldera	
Tipo	Tubos de fuego de 3 pases
Marca	Sadeka (España, 1980)
Tiro	Forzado mecánico
Capacidad de Producción	2,8 t/h
Entrega del vapor	Saturado
Presión de diseño	12 kg f/cm^2
Presión de trabajo	10 kg f/cm^2

Tabla 2.11. Datos del sistema de combustión.

Quemador	
Marca	Ray
Modelo	BGF-600

Tipo	Copa Rotatoria
Combustible	Petróleo crudo
Potencia Nominal Máxima	7500 KW

2.4.1 Principales puntos débiles detectados en los sistemas auxiliares.

Sistema de Tratamiento de Agua.

Problema:

- Filtros en mal estado, sobre todo la cubierta, hay que estar soldando cada cierto tiempo.
- Alta corrosión en las torres de intercambio iónico sobre todo en las partes inferiores, producto de los años de explotación.

Solución:

- Solicitar a mantenimiento el cambio de la carcasa de los filtros.
- Proponer una sustitución de las torres de intercambio iónico.

Sistema de Enfriamiento.

Problema:

- Pacas en muy mal estado debido a que son viejas, siendo del 2006, estando desgastadas por el uso.

Solución:

- Solicitar a mantenimiento la adquisición de nuevas pacas.

Generación de Vapor.

Problema:

- Elevadas emisiones de gases contaminantes.
- No hay una cuantificación de los balances de masa y energía.

Solución:

- Solicitar la compra de un analizador de gases para monitorear la combustión.
- Determinar los balances de masa y energía para tener criterio de cuantificación de las variables, así como de la eficiencia de la caldera.

En el **Anexo 2** se muestran los sistemas auxiliares presentes en el sistema de rectificación de alcohol.

2.5 Diagnóstico en el sistema de generación de vapor. Evaluación del sistema actual.

El diagnóstico al sistema de generación de vapor se realizó de una manera integral, analizando primeramente, la calidad del aire luego del proceso de combustión del crudo cubano. Posteriormente se determina la eficiencia de la caldera y se realiza la modelación de la generación de vapor para estudiar el comportamiento de las diferentes variables, composiciones y parámetros el proceso, mediante el uso del software Aspen Plus.

Previo al análisis de la calidad del aire obtenido como resultado de la combustión, es importante tener en cuenta, que entre los principales contaminantes se encuentran, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y material particulado. Algunas consideraciones al respecto de los mismos se describen a continuación:

Dióxido de azufre: Se produce mediante la quema de combustibles fósiles que contienen azufre en la generación de energía térmica, calefacción, cocción y transporte. Otras fuentes son la refinación de petróleo, la erupción volcánica y la fundición de minerales metálicos. Es un gas estable no inflamable, no explosivo e incoloro que puede detectarse por el gusto. Es el principal causante de la lluvia ácida ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico, además es un gas irritante y tóxico, afecta sobre todo las mucosidades y los pulmones provocando ataques de tos. Si bien éste es absorbido principalmente por el sistema nasal, la exposición de altas concentraciones por cortos períodos de tiempo puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos (Stanley, 2015).

Óxidos de nitrógeno: Pueden encontrarse varios óxidos de nitrógeno en la atmósfera, ejemplo: el óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico o monóxido de nitrógeno (NO), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el trióxido de nitrógeno (N_2O_3) y el pentóxido de nitrógeno (N_2O_5). Las fuentes más importantes de NO y de NO_2 son los automóviles y las centrales termoeléctricas. El NO emitido por distintas fuentes es rápidamente transformada a NO_2 en presencia de luz solar y de hidrocarburos activos. Los óxidos de nitrógeno, una vez liberados al aire por las combustiones (NOx) crean, a través de reacciones fotoquímicas, contaminantes secundarios, por ejemplo el PAN (nitrato de peroxiacetilo), formando el esmog fotoquímico o niebla característicos de las grandes ciudades (ATSDR, 2013).

Monóxido de carbono: La emisión total de monóxido de carbono supera a la de otros contaminantes gaseosos juntos y su tiempo de permanencia en la atmósfera se estima entre 2 y 4 meses. Los principales responsables de los elevados niveles en el aire urbano son la combustión incompleta de los derivados de petróleo y carbón.

Material particulado: El material particulado es muy peligroso al medio ambiente, incluye a las Partículas Totales Suspendidas (PTS), con un diámetro aerodinámico da ≥ 10 µm, el PM_{10} (partículas torácicas) con da ≤ 10 µm, el $PM_{2.5}$ (partículas respirables) con da $\leq 2{,}5$ µm, PM_1 con da ≤ 1µm y el $PM_{0.1}$ (partículas ultra finas) con da $\leq 0{,}1$ µm. El PM_{10} y $PM_{2.5}$ tienen la capacidad de adsorber sustancias químicas activas presentes en la atmósfera, otras partículas son altamente corrosivas o tóxicas debido a su propia naturaleza química, en ambos casos son partículas muy agresivas al medio ambiente (ASTM, 2005, EPA, 2012, Stanley, 2015).

El tamaño de las partículas es determinante para sus efectos en la salud humana, por su capacidad de penetración en el árbol respiratorio y su permanencia en suspensión en el aire, cuanto más pequeña es una partícula (menor o igual a PM_{10}), más tiempo permanecerá en suspensión en el aire y más profundamente penetrará en el pulmón, permaneciendo en los alvéolos pulmonares por años (HEI, 2014).

Dióxido de Carbono: El dióxido de carbono, junto al vapor de agua y otros gases, es uno de los gases de efecto invernadero (G.E.I.), reduciendo la emisión de calor al espacio y provocando un mayor calentamiento del planeta. Con el crecimiento de la combustión de combustibles fósiles la concentración está aumentando continuamente, causando un cambio climático antropogénico (IPCC, 2015).

2.5.1 Caracterización de la calidad del aire.

Se realizó una caracterización y evaluación de la calidad del aire como resultado de las emisiones de la ¨Ronera Central¨ por el Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara.

La determinación de las emisiones de los contaminantes se efectuó a través de factores de emisión correspondientes a Emission Factor Listing Developed by Technology Transfer. EPA-450/4-89-022. U.S. Environmental Protection Agency, validados por el Instituto de meteorología de la provincia de Villa Clara.

El método aplicado para la modelación de la dispersión de contaminantes es el utilizado por la (USEPA), el software fue el ISCST3 Versión 3.15 ® para Windows® confeccionado por la Lakes Environmental Software ™ de la U.S. EPA.

Para la evaluación de la calidad del aire se tuvo en cuenta los resultados de la modelación de la dispersión de los contaminantes y lo establecido en la (NC-111, 2004) y (NC-1020, 2014). Ver **Anexo 3** en el que se muestra información de las NC para la evaluación de la calidad del aire.

En el **Anexo 4** se muestra la dispersión del SO_2 en 24 horas emitido por la caldera. El SO_2 alcanza valores máximos de 100 mg/m^3 a una distancia entre 50 y 350 m a sotavento de la fuente, superando la concentración máxima admisible en un 222% según (NC-1020, 2014), para una categoría de calidad del aire de ¨Mala¨ (color rojo), según (NC-111, 2004). Bajo estas condiciones ocurre un aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad en la población.

La carga contaminante emitida por esta fuente a la atmósfera, debido al consumo de combustible en un año de trabajo, donde el SO_2 es el contaminante de mayor cuantía con 140,4 t/año, representando el 87 % del total, debido al elevado por ciento de azufre en el combustible, seguido por los NOx con 7,91 t/año y en tercer lugar el PM_{10} con 6,74 t/año y en menor proporción CO y $PM_{2.5}$.

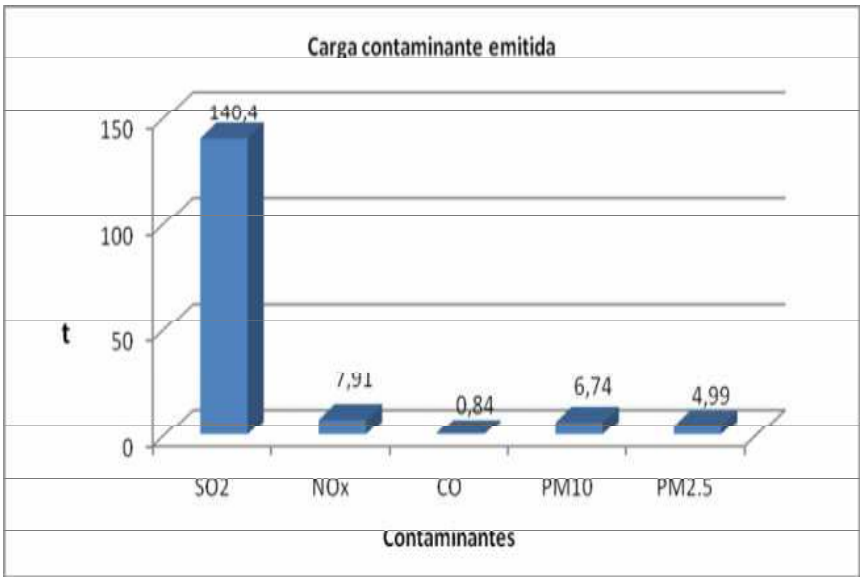


Figura 2.2 Carga contaminante emitida a la atmósfera.

2.5.2 Cálculo de la eficiencia de la caldera.

La eficiencia es, desde el punto de vista de la economía el parámetro más importante, pues caracteriza con que efectividad el generador de vapor capta, para la conversión de agua a vapor, el calor liberado por el combustible.

Por tanto, la eficiencia se puede expresar en términos energéticos como la relación entre el calor que recibe el agua para convertirse en vapor y el que debe entregar el combustible de acuerdo a su potencia calorífica (eficiencia energética) y en términos de masa como la relación entre el vapor producido y el combustible consumido (índice de generación).

La mayor parte del calor que se libera en el horno de un generador de vapor (*calor disponible*, Qd) llega al agua a través de las superficies de transferencia de calor como resultado de lo cual el agua alimentada a la caldera se calienta hasta la temperatura de saturación, se evapora y el vapor de agua se sobrecalienta. Este calor aprovechado por el agua para convertirse en vapor constituye lo que se denomina *Calor útil* (Q1). Ambos términos energéticos se expresan en unidades energéticas por kg de combustible (Pons, 1990).

Método Directo:

Exige el conocimiento de todos los parámetros de operación del equipo, es decir, combustible quemado y su valor calórico, vapor producido y sus parámetros, calidad del agua utilizada y otros, para determinar:

Los valores de entalpía del vapor producido y entalpía del agua de alimentación fueron sacados de (Keenan, 1988). La nomenclatura utilizada en el desarrollo del trabajo se encuentra especificada en el **Anexo 5**.

Tabla 2.12. Cálculo de la eficiencia energética utilizando el Método Directo.

Término	Fórmula	Datos	Resultado
η	$\eta = (Q1/Qd)*100$	Q1= 6131888,28 KJ/Kg Qd=1937040 Kcal/h	**0,86**
Q_1	$Q_1 = \frac{1}{mc}$ [Wv (hv - haa) + Me (hf- haa)]	mc = 235 Kg/h Wv = 2800 Kg/h tv = 180 ºC Pv = 0,9 MPa hv = 2785,5 KJ/Kg ta = 89 ºC Pa = 0,97 MPa haa = 373,776 KJ/Kg Me - No se realizan extracciones continuas	**7799400 KJ/Kg**

Qd	Qg + n Qc = 0 Qg = -n Qc n = Qg/Qc Qc= mc*Pc	Pc= 9224 Kcal/Kg mc=210 Kg/h	2167640 Kcal/kg

Como resultado se obtiene una eficiencia en la caldera de un 86 %. En la actualidad los generadores de vapor que se fabrican presentan eficiencias energéticas que oscilan entre el 88 y el 92 % de su producción nominal, pero en Cuba aún se encuentran equipos que presentan valores de eficiencias inferiores al 60%, por tanto, la eficiencia de la caldera se puede considerar adecuada bajo las condiciones de operación reales. La eficiencia viene determinada por dos factores determinantes, como son la combustión completa del combustible y el enfriamiento de los gases productos de la combustión.

Para tener criterio de cuantificación de las variables principales del proceso, así como la determinación de los balances de masa y energía en el sistema de generación de vapor, se procede a la simulación del proceso utilizando el software Aspen Plus. En el próximo capítulo se plantea dicha evaluación.

CAPITULO 3. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS.

3.1 Diseño de la columna recuperadora de alcohol fino usando el Aspen Plus.

Como resultado de estudios anteriores, en la columna rectificadora de alcohol se obtuvieron discrepancias en cuanto a los platos donde existían mayores concentraciones de n-propanol e isobutanol fundamentalmente. Para el caso donde las composiciones de las flemas de entrada presentan altos componentes de impurezas, se obtenía que las extracciones que se realizan en la columna, no facilitan la eliminación de las impurezas, por lo que estos componentes quedan dentro de la columna haciendo inestable la operación.

A continuación, en la tabla 3.1 se muestran los límites bajos y altos para cada uno de los componentes en la flema, y sus concentraciones en mg/L y % peso, según los datos históricos reportados.

Tabla 3.1. Composiciones altas y bajas de flema en mg/L y % masa.

Componentes	Bajo		Alto	
	%, mg/L	%	%, mg/L	%
Etanol	0,94	0,94	0,956	0,956
H_2O	0,06	0,06	0,044	0,044
Aceta-01	8,757	1,11E-08	274,97	3,49E-07
Metanol	0,5	6,35E-10	30,46	3,87E-08
n-Propanol	13,108	1,66E-08	556,4	7,06E-07
Isobutanol	9,552	1,21E-08	290,7	3,69E-07
Isoamílico	0	0	49,2	6,24E-08

Precisamente para mejorar la eficiencia de esta etapa se propone el diseño de la columna recuperadora con ayuda de la simulación para estudiar el comportamiento del sistema y obtener las mejores condiciones operacionales, así como mejorar la eficiencia y estabilidad en el sistema.

Para la simulación se sigue la siguiente estrategia típica para estos estudios, según la figura 3.1.

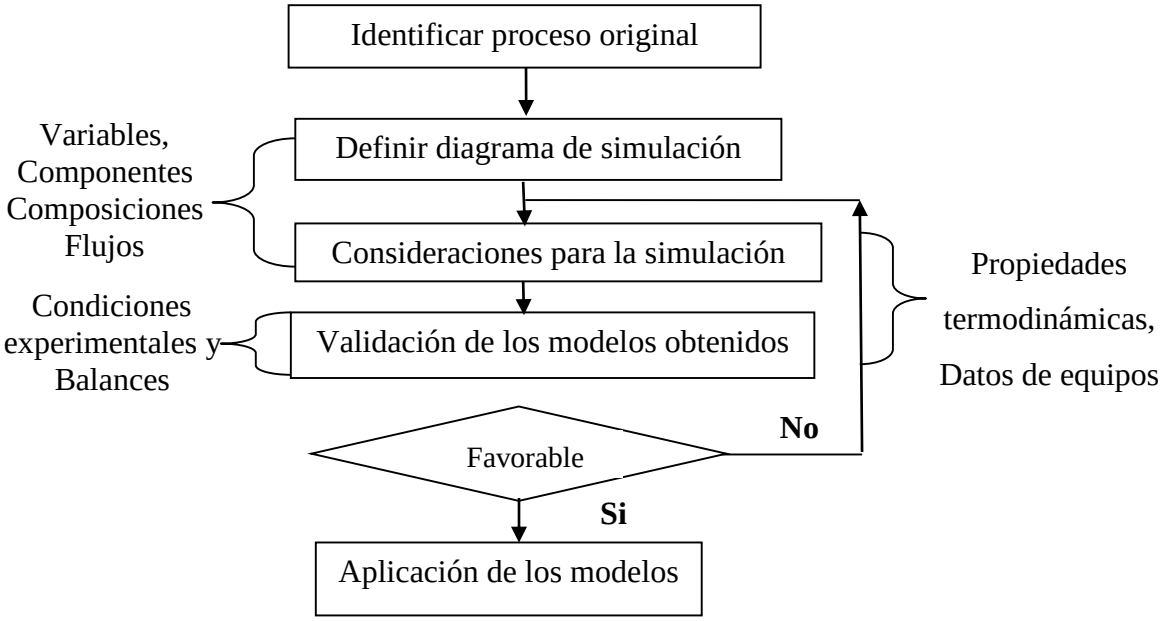


Figura 3.1 Estrategia para la simulación de los procesos.

A la columna recuperadora se le alimenta los alcoholes D, obtenido de la columnas hidroselectora y el fusel total acumulado en todas las extracciones, procedentes del tanque de fusel. De la misma se obtiene alcohol D final y un alcohol recobrado que se alimenta al proceso para su recirculación y lavado. El residuo debe contener valores de composiciones de etanol cercanos a cero.

En la figura 3.2 se muestra la simulación de la columna recuperadora en Aspen Plus.

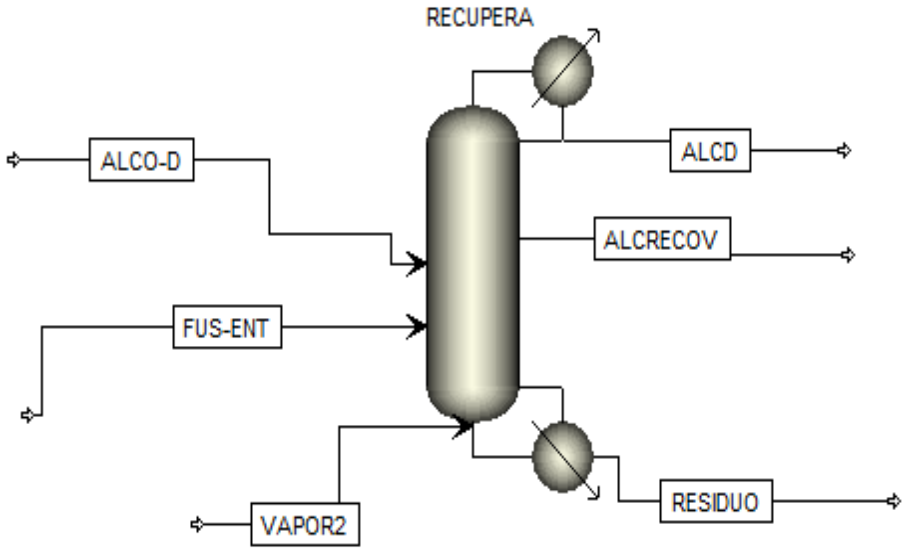


Figura 3.2 Simulación de la columna recuperadora.

Selección del modelo:

Se utiliza el modelo RadFrac. El módulo RadFrac es utilizado para realizar la simulación rigurosa de columnas de destilación y, en general, todo tipo de operaciones de fraccionamiento multietapas líquido-vapor. Este módulo es capaz de simular destilación ordinaria, absorción, absorción con calentamiento, desorción, desorción con calentamiento, destilación reactiva, destilación extractiva, destilación azeotrópica, destilación multicomponentes. RadFrac puede manejar sistemas de dos fases, tres fases, con puntos de ebullición cercanos y lejanos, con una fase líquida no ideal. También es capaz de detectar y manejar cálculos libres de agua y una segunda fase líquida en cualquier parte de la columna. El paquete termodinámico en cada etapa del proceso se determinó según los métodos de selección, comparando el método ideal con los métodos reales en función de las constantes de equilibrio. Para el sistema etanol-agua, los métodos termodinámicos que mejores resultados ofrecen son: Margules, UNIFAC, UNIQUAC, Van Laar, Wilson y NRTL. Al mantener las mismas condiciones de temperatura y presión, en el sistema ideal y real.

Método utilizado:

El método que mejores resultados mostró para el sistema en estudio fue el método Wilson para el equilibrio vapor-líquido a bajas presiones. El método consiste en predecir el comportamiento de mezclas multicomponentes a partir de la regresión de datos de equilibrio binario.

En las tablas 3.2 y 3.3, se muestran datos de diseño que le son introducidos al programa para la simulación, así como las corrientes de entrada y salida por platos.

Tabla 3.2. Datos para la simulación.

Columna recuperadora	
Número de platos	20
Flujo de destilado	1,52 L/min
Relación de reflujo	10
Flujo de Alcohol Rec.	0,8 L/min

Tabla 3.3 Corrientes de entrada y salida por platos.

Entrada por platos		**Salida por platos**	
Alcohol D	20	Alcohol D	1

Fusel	20	Residuo	20
Vapor	21	Alcohol Rec.	6

Para el diseño de la columna, se define en el simulador especificaciones, tales como la pureza en la corriente destilada, en el residuo, las variables a manipular bajo esas condiciones y las características de los platos. A continuación, en las tablas 3.4 y 3.5 se especifican las mismas.

Tabla 3.4. Especificaciones de diseño.

Pureza másica en Residuo	0,001 alcohol
Pureza másica en Destilado	0,94 alcohol
Variación	
Relación de reflujo	1-15
Flujo de destilado	0,5-1,6 L/min.

Tabla 3.5. Características de los platos.

Tipos de platos	Válvula
Número de pases	1
Diámetro	1,5 m
Espaciado entre platos	0,33 m

Validación.

Como se puede observar, en la tabla 3.6, los modelos ajustan bajo las condiciones especificadas en el diseño, con poco margen de error.

Tabla 3.6. Correspondencia con las especificaciones de diseño.

Tipo	Valor final	Valor Calculado	Error
Pureza másica	0,001	0,004810325	-0,00381032
Pureza másica	0,94	0,941299312	-0,00129931

Con la introducción de los datos necesarios al simulador, y el ajuste de los modelos obtenidos, se obtuvieron los datos de diseño de la columna y las partes que la conforman mostradas en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9 respectivamente.

Tabla 3.7. Datos de diseño de la columna recuperadora simulada en Aspen Plus.

Columna recuperadora	
Diámetro	0,95 m
Altura	4,75 m
Número de platos	20
Espaciado entre platos	0,25 m

Tabla 3.8. Datos del (condensador).

Condensador	
Tipo	Condensador Total
Número de pasos	2
Relación de reflujo molar	62,82
Razón de fondo	17,62 Kmol/h
Relación de destilado	1,85 Kmol/h
Temperatura tope	85,74 ºC
Presión tope	1,3 atm
Calor cedido tope	-304727,93 cal/s
Relación de reflujo tope	116,2 Kmol/h

Tabla 3.9. Datos del (reboiler).

Reboiler	
Presión	1 atm
Temperatura	106,87 ºC
Calor cedido	301467,8 cal/s

En la tabla 3.10 y 3.11 se muestran los balances de masa y energía, de las principales corrientes de la columna recuperadora.

Tabla 3.10. Balance de masa en la columna recuperadora.

Corrientes	Alc. D	Alco-D	Alcohol Recov.	Fusel entrada	Residuo
Flujo Másico kg/h					
Etanol	73,5329	50,6582	33,61238	33,61238	1,534039
H_2O	4,58521	3,217334	2,239665	2,239665	317,3674
Acetaldehídos	0,0003764	0,000402	5,25E-07	5,25E-07	5,19E-07
Metano1	8,82E-06	7,98E-06	8,47E-07	8,47E-07	2,29E-07

n-Propanol	1,19E-05	1,09E-08	3,50E-05	3,50E-05	6,63E-07
Isobutanol	2,86E-06	5,77E-12	2,37E-05	2,37E-05	6,30E-07
Isoamílico	6,43E-13	0,0040580	2,37E-11	2,37E-11	0,0040583
Fracción Másica					
Etanol	**0,9412993**	**0,9402041**	**0,9375288**	**0,3493492**	**0,0048103**
H_2O	0,0586955	0,0597129	0,0624695	0,6506504	0,9951769
Acetaldehídos	4,82E-06	7,46E-06	1,46E-08	1,79E-24	1,63E-09
Metano1	1,13E-07	1,48E-07	2,36E-08	1,36E-08	7,18E-10
n-Propanol	1,52E-07	2,03E-10	9,78E-07	2,73E-07	2,08E-09
Isobutanol	3,66E-08	1,07E-13	6,60E-07	1,56E-07	1,98E-09
Isoamílico	8,24E-15	7,53E-05	6,61E-13	1,53E-09	1,27E-05
Flujo Molar kmol/h	1,850672	1,278237	0,8539301	8,154812	17,64989
Flujo Másico kg/h	78,11851	53,88	35,85211	186,61	318,9055
Flujo Volumétrico m^3/h	0,10	0,072	0,0486	0,2184	0,354
Temperatura ºC	84,7457	75	84,6864	84	106,8791
Presión atm	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Tabla 3.11. Balance de energía en la columna recuperadora.

Corrientes	Alc.D	Alco-D	Alcohol Recov.	Fusel entrada	Residuo	Vapor 2
Entalpía molar KJ/Kmol	-270890	-272280	-271000	-279460	-27951	-273890
Entalpía másica KJ/Kg	-6417,561	-6459,5	-6454,677	-12212,2	-15469	-15203,1
Flujo de entalpía KW	-139,2584	-96,677	-64,28162	-633,035	-1370,3	-844,617
Entropía molar KJ/Kmol-K	-295,842	-299,20	-294,4142	-177,962	-144,92	-131,471
Entropía másica J/Kg-K	-7008,666	-7098,3	-7012,396	-7776,88	-8020,8	-7297,76
Densidad Kg/m^3	735,4233	748,28	736,1715	852,4106	909,708	839,7355

3.1.1 Aplicación del modelo de la columna recuperadora.

Una de las grandes ventajas de la simulación es que se pueden hacer estudios del comportamiento de las variables fundamentales en la columna, lo que es una herramienta muy útil para el análisis y comprensión de su funcionamiento.

En la figura 3.3 mostrada a continuación se muestra el perfil de composición de la fase líquido por platos en la columna recuperadora. En la misma se puede apreciar que los compuestos n-propanol e isobutanol alcanzan su pico de composición más altos, entre los platos 14 y 16.

Precisamente, estas impurezas son las que vienen quedando de la columna rectificadora, y al poder extraerlas en esta columna, pues se logran efectos muy beneficiosos al proceso.

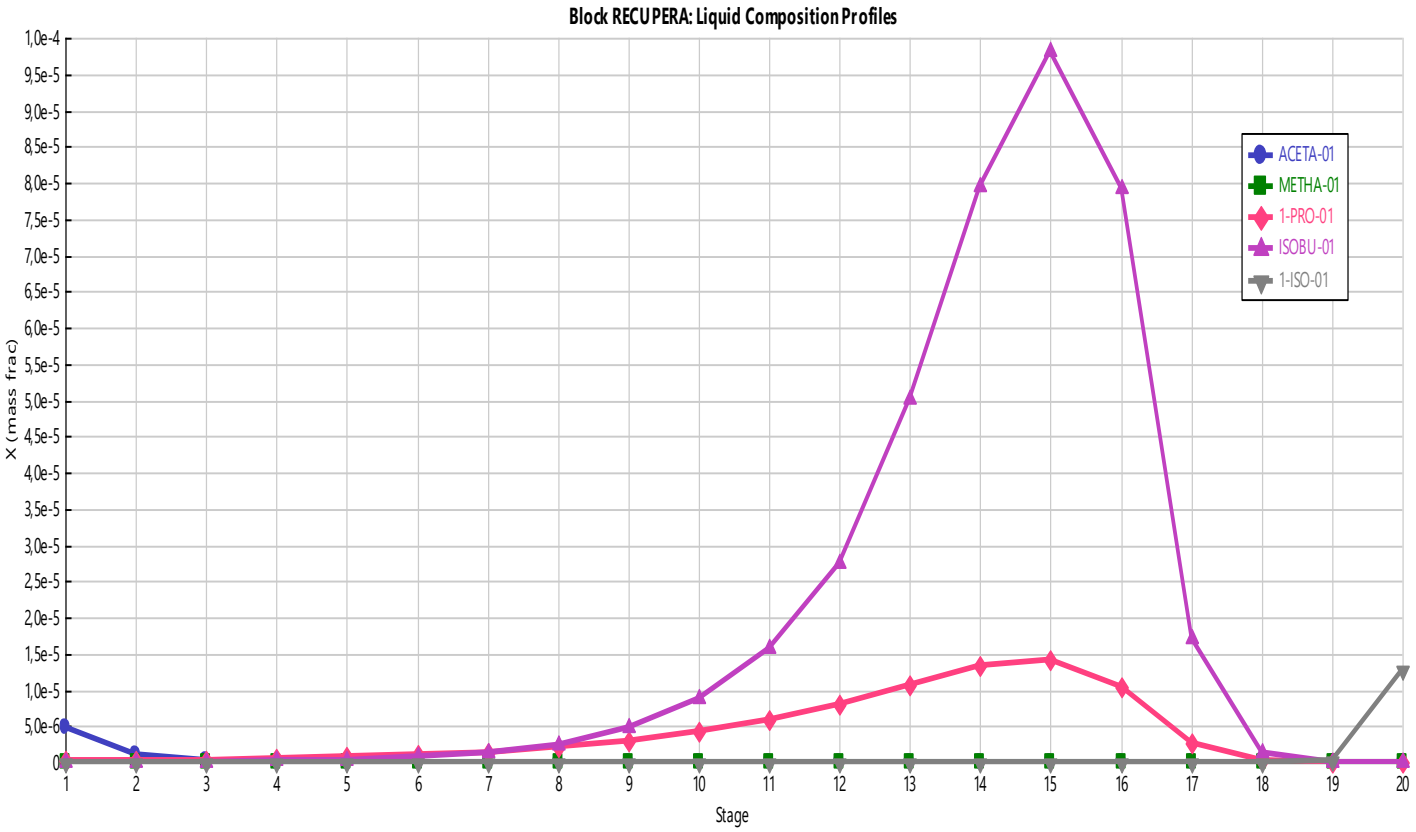


Figura 3.3 Perfil de composición del líquido por plato en la Columna Recuperadora.

En la figura 3.4 se puede observar como los mayores rangos de temperatura están en los platos del 19 al 20 tanto para el vapor como el líquido, lo cual se ajusta con la realidad del sistema

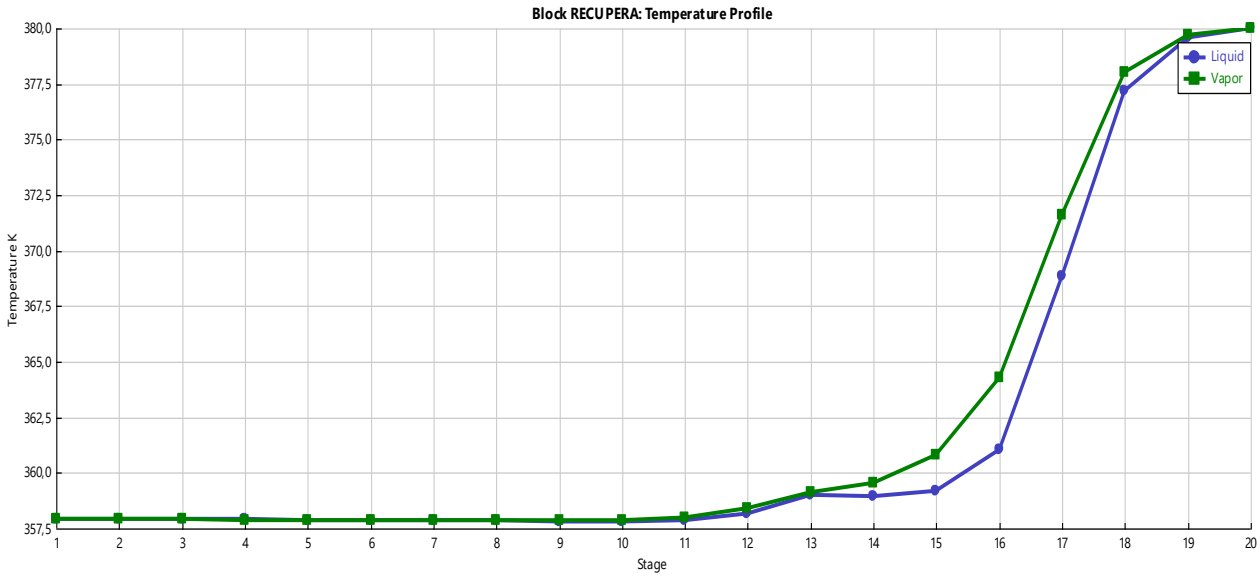


Figura 3.4. Perfil de temperatura por plato en la Columna Recuperadora.

3.1.2 Incorporación de la columna al sistema completo.

Partiendo de los resultados obtenidos por (Romero, 2017), se corroboran los mismos con la incorporación de la columna recuperadora en el sistema, tal y como se muestra en la figura 3.5. En este caso, el alcohol recobrado se recircula a la columna hidroselectora.

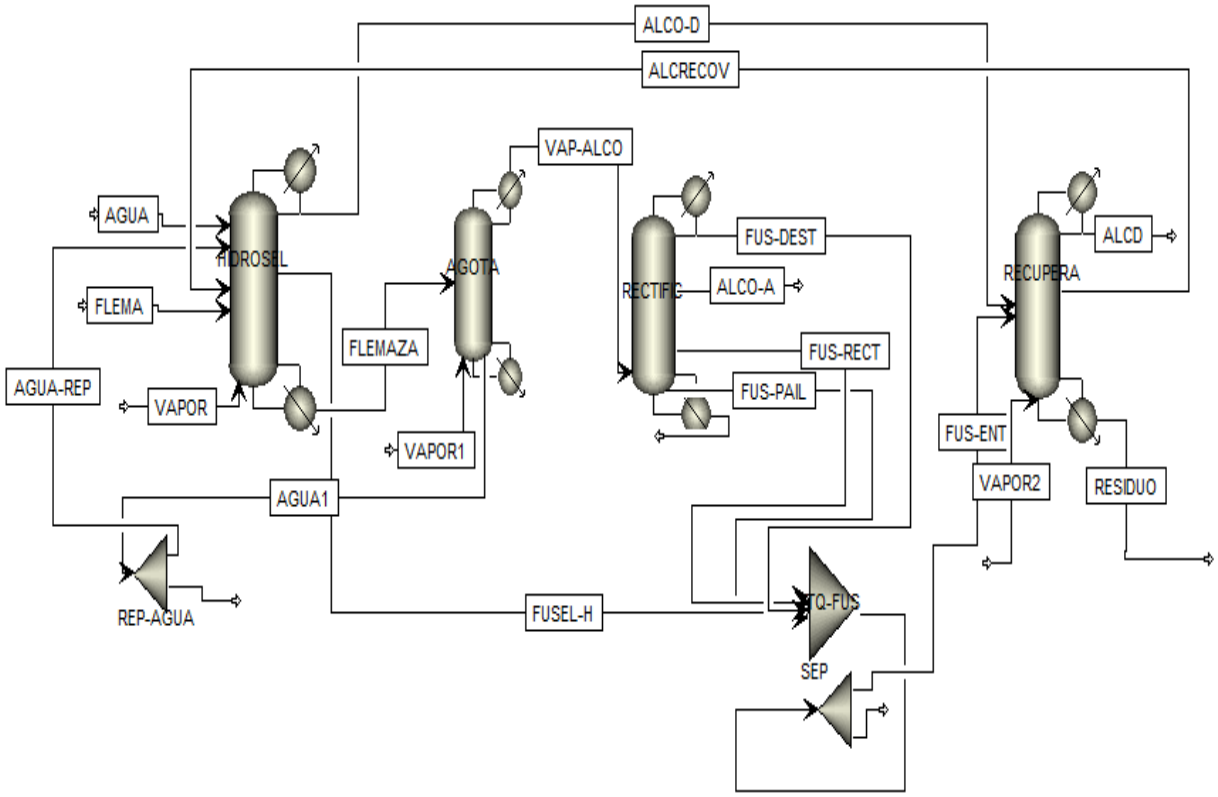


Figura 3.5 Esquema general con la incorporación de la Columna Recuperadora.

En la tabla 3.12 se muestran los balances de masa y energía obtenidos para los datos de las composiciones altas de impurezas en la flema de entrada. Se puede observar cómo mejoran las composiciones de alcohol en cada corriente, alcanzando mayores purezas de alcohol A, producto final, así como, menores composiciones de alcohol en el residuo, lo cual favorece la rectificación del alcohol y la eliminación de impurezas.

Tabla 3.12. Balance de masa y energía para composiciones altas.

Corrientes	**Flema**	**Alc. D**	**Alcohol Recov.**	**Residuo**	**Alcohol A**
Fracción Másico					
Etanol	**0,95599**	**0,939998**	**0,9300643**	**0,0001**	**0,9736285**
H_2O	0,043	0,059987	0,069934	0,99989	0,02637
Acetaldehído	3,49E-07	1,51E-05	1,15E-07	1,50E-13	0
Metanol	3,87E-08	4,92E-07	7,14E-08	4,68E-11	3,34E-08
n-Propanol	7,06E-07	1,25E-15	5,43E-08	9,56E-10	1,99E-07
Isobutanol	3,69E-07	1,02E-07	6,39E-07	4,98E-09	2,83E-10
Isoamílico	6,24E-08	6,25E-14	5,73E-13	1,34E-07	0
Flujo Total kmol/h	26,73996	0,437395	0,6085	11,84888	19,433
Flujo Total kg/h	1152,891	18,42886	25,28	213,474	589,95
Temperatura ºC	80	77,98	78,15	100	78,2
Presión atm	1	1	1	1	1

A continuación se muestran los perfiles de concentraciones en cada plato por columna. En la figura 3.6, se observa el comportamiento para la columna hidroselectora. El mayor porcentaje de impurezas se encuentra en el líquido y no en los vapores debido a que la volatilidad relativa o K' es siempre menor que la unidad. En este caso las mayores concentraciones de acetaldehído, isoamílico y metanol se van por el tope en esta columna. Sobre todo en el caso del n-propanol y el isobutanol, al ser impurezas híbridas se van eliminando en las extracciones que se le van haciendo a las columnas.

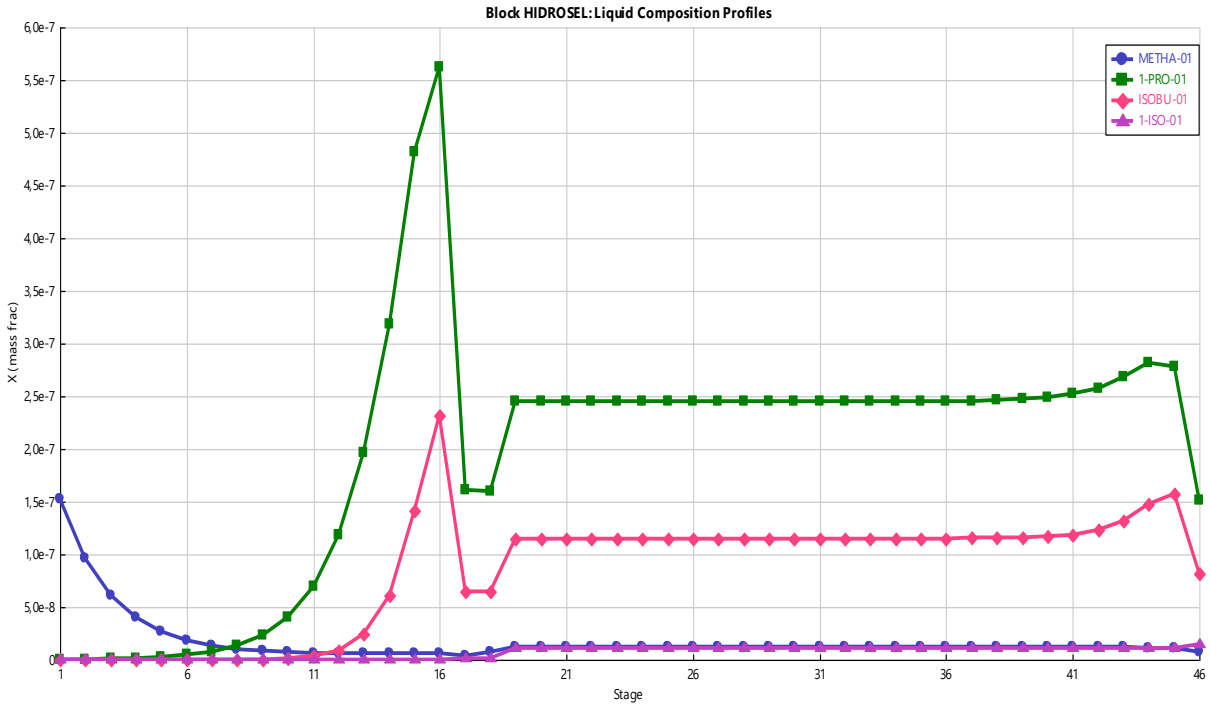


Figura 3.6 Perfil de composición del líquido por plato en la Columna Hidroselectora.

Para el caso de la columna rectificadora, (figura 3.7), las mayores concentraciones de n-proponal e isobutanol estan en los platos 24 y 25. Cuando se analiza el sistema sin la columna las mayores concentraciones estaban en los platos 43 y 44, por lo que aprecia un desplazamaiento de los perfiles de composiciones al completar el sistema.

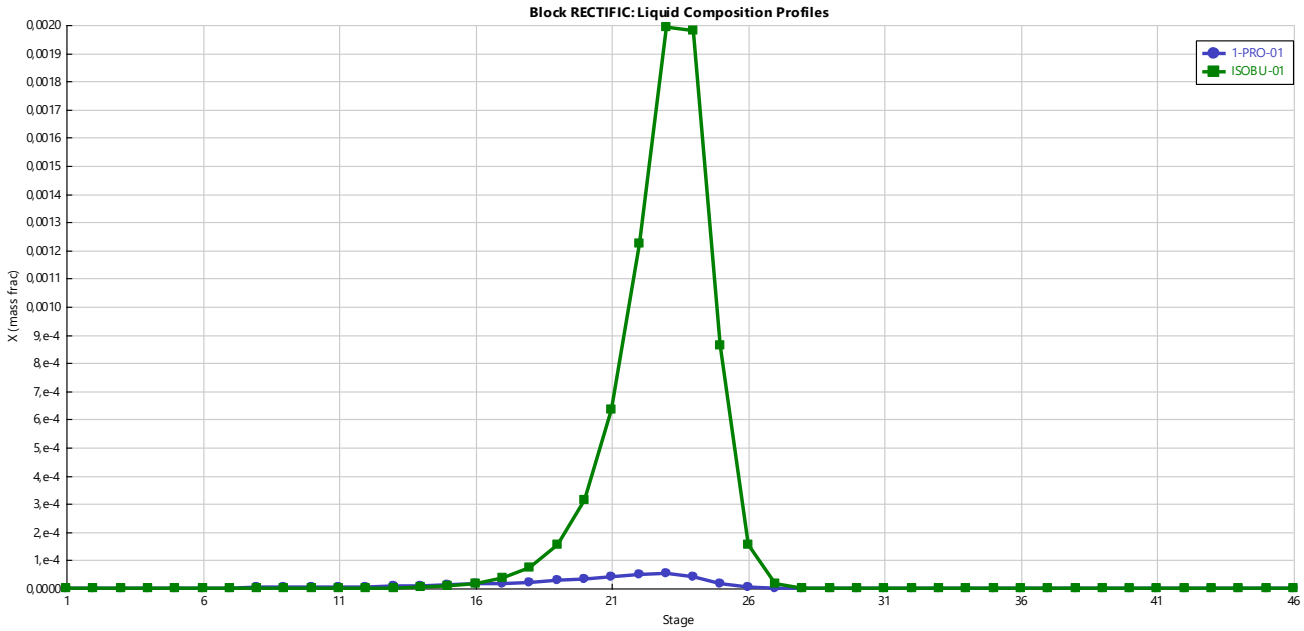


Figura 3.7 Perfil de composición del líquido por plato en la Columna Rectificadora.

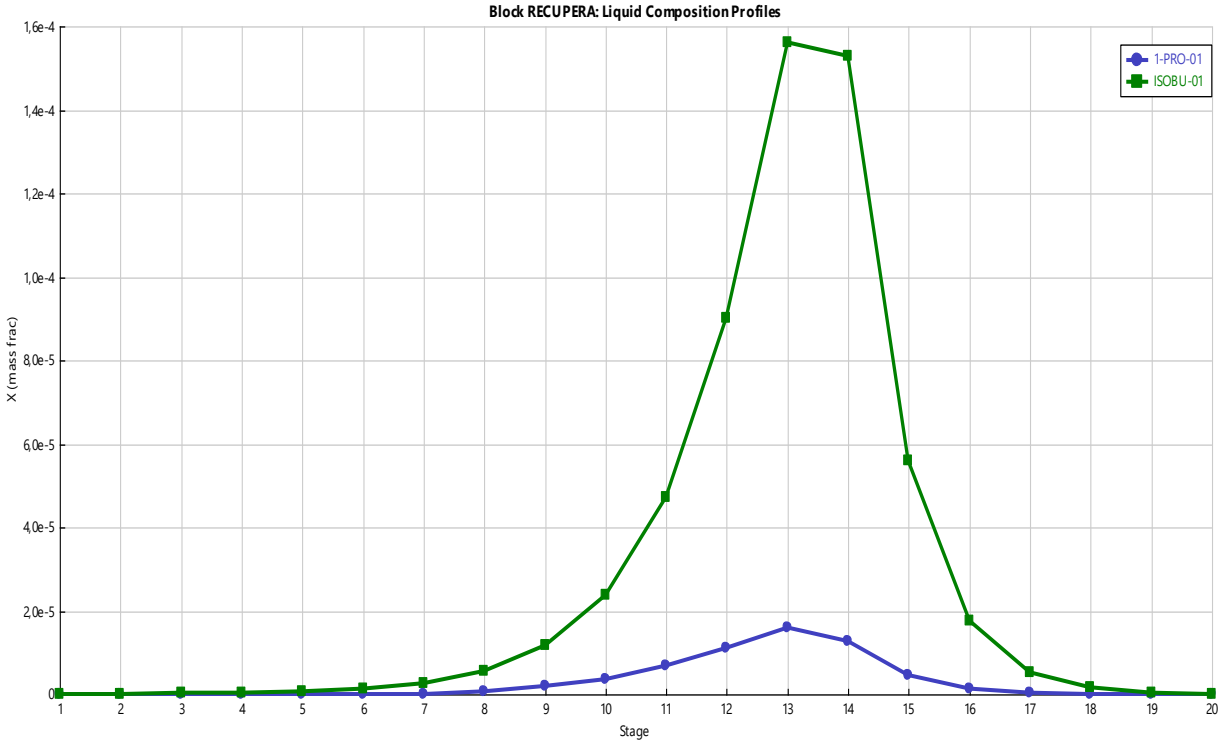


Figura3.8 Perfil de composición del líquido por plato en la Columna Recuperadora.

Cuando se incorpora la columna recuperadora (figura 3.8) al sistema, cambian los valores de las concentraciones de n-propanol e isobutanol a los platos del 12 al 14.

Como resultado final, se tiene que, la incorporación de la columna recuperadora al proceso instalado, ofrece ventajas significativas toda vez que corrobora la importancia del sistema completo de rectificación de alcohol, incrementa el porciento de Alcohol Fino A en la salida, disminuye casi a cero la composición de alcohol en el residuo a la salida y logra mayor eficiencia en la eliminación de las impurezas.

3.2 Simulación del sistema de Generación de Vapor.

Con vistas a dar solución a que no existe una cuantificación adecuada de los balances de masa y energía en el sistema de generación de vapor, y mejorar la eficiencia energética del mismo, con la disminución de los consumos de combustible, se procede a la simulación del sistema de generación de vapor.

Se considera como materia prima el crudo cubano, con la composición mostrada en la tabla 3.13, así como, los resultados de las composiciones obtenidas en la evaluación de la calidad del aire para los gases de la combustión, en la tabla 3.14.

Tabla 3.13. Composición de la materia prima (crudo cubano).

Elementos	Cantidad (% peso)
Carbono (C)	81,80
Hidrógeno (H_2)	10,29
Azufre (S)	6,31
Agua (H_2O)	0,6
Cenizas	0,0408

Tabla 3.14. Composición de los gases de combustión a la salida.

Elementos	Cantidad (mg/m^3)
Dióxido de azufre (SO_2)	1,41 mg/m^3
Monóxido de carbono (CO)	0,261 mg/m^3
Hollín (mp)	3,628 mg/m^3
Dióxido de carbono (CO_2)	9,9 %
Oxígeno (O_2)	8,4 %

Las reacciones de combustión a considerar son las siguientes:

$$C+O_2=CO_2 \quad (I)$$

$$C+\frac{1}{2}O_2=CO \quad (II)$$

$$H_2+\frac{1}{2}O_2=H_2O \quad (III)$$

$$S+O_2=SO_2 \quad (IV)$$

$$N_2+O_2=NO_2 \quad (V)$$

Se incorporan en los análisis, resultados experimentales de las mediciones de la calidad del aire y los datos de la caldera instalada. Las conversiones de las reacciones de combustión, fueron ajustadas en función de los requerimientos, y las composiciones de los gases a la salida del horno.

El método termodinámico seleccionado el BPitzer para este sistema siendo el de mejor ajuste. El método BPitzer responde a la ecuación de estado tipo virial en función de z f (T, P); para sustancias apolares responde acertadamente su comportamiento.

Consideraciones:

- Flujo de combustible: 235 Kg/h.
- Exceso de aire: 45%
- Flujo de agua: 2800 Kg/h.

Tabla 3.15. Modelos seleccionados en el proceso.

Etapas	Modelo	Descripción
Generación de vapor	RSTOIC HEATX	- Simula las reacciones de combustión en el horno. - Simula el intercambio de calor agua-vapor.

En la figura 3.9 se muestra el esquema de Generación de Vapor del proceso simulado, utilizando ambos modelos.

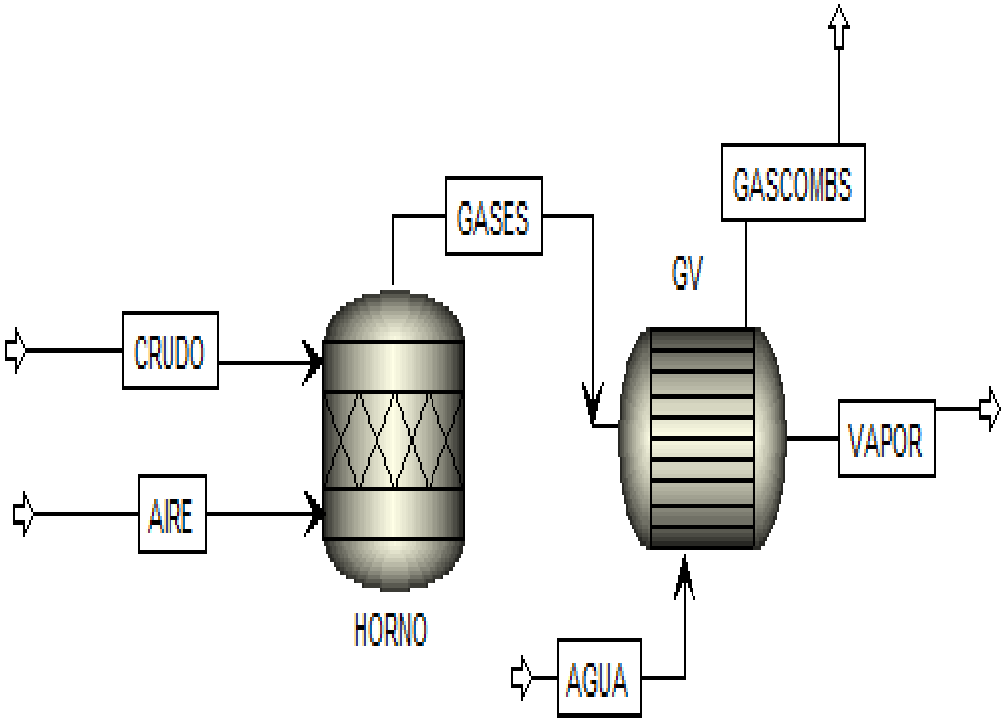


Figura 3.9 Simulación del esquema de Generación de Vapor.

En el **Anexo 6** se muestra la simulación del diagrama de Generación de Vapor, con las corrientes de temperatura, flujo másico y volumétrico; así como las herramientas de cálculo para el ajuste del modelo.

Tabla 3.16. Validación del modelo.

	Cálculo	**Simulación**
Calor (combustible)	2521 KJ/Kg	2525 KJ/Kg
Calor útil (agua)	2013,1 KJ/Kg	2208 KJ/Kg
Temperatura de los gases (salida)	224 ^{o}C	235 ^{o}C
Eficiencia	86 %	87,4 %
Dióxido de carbono (CO_2)	9,9 %	10,5 %
Oxígeno (O_2)	8,4 %	7,7 %

En las tablas 3.17, 3.18 y 3.19 se muestran la estequiometria de las reacciones, y los balances de masa y energía en el horno y el generador de vapor respectivamente.

Tabla 3.17. Estequiometria de las reacciones de combustión y su correspondiente Flujo Molar.

No.	**Flujo Molar (kmol/s)**	**Estequiometria**
1	0,002795141	$C + O_2 = CO_2$
2	0,000598959	$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$
3	0,002243526	$\frac{1}{2} O_2 + H_2 = H_2O$
4	0,000113013	$O_2 + S = SO_2$
5	0,000164546	$O_2 + N_2 = 2\ NO$

Tabla 3.18. Resultados del Balance de Masa y Energía en el horno.

Total	**Unidades**	**Entrada**	**Salida**	**Generación**	**Diferencia**
Flujo Molar	kmol/s	0,051095	0,04625	-0,00484	1,36E-16
Flujo Másico	kg/h	4700	4700		0
Entalpía	kW	37,8028	587,64		-0,93567

Tabla 3.19. Resultados del balance de masa y energía en el generador de vapor.

Corrientes	Crudo	Aire	Gases comb.	Agua	Vapor
Flujo Másico kg/h					
C	193,213	0	28,982	0	0
O_2	0,236	937,65	359,635	0	0
N_2	0,944	3527,35	3510,653	0	0
H_2	24,293	0	6,073	0	0
S	14,897	0	0,298	0	0
CO	0	0	67,588	0	0
H_2O	1,417	0	164,242	3000	3000
CO_2	0	0	495,569	0	0
SO_2	0	0	29,168	0	0
NO	0	0	37,793	0	0
Fracción Másica					
C	0,822	0	0,006	0	0
O_2	0,001	0,21	0,077	0	0
N_2	0,004	0,79	0,747	0	0
H_2	0,103	0	0,001	0	0
S	0,063	0	6,04E-05	0	0
CO	0	0	0,014	0	0
H_2O	0,006	0	0,035	1	1
CO_2	0	0	0,105	0	0
SO_2	0	0	0,006	0	0
NO	0	0	0,008	0	0
Flujo Total kmol/s	0,008	0,043	0,046	0,046	0,0465
Flujo Total kg/h	235	4465	4700	3000	3000
Flujo Volumétrico m^3/h	358	3797,43	25018,63	3,097	907,11
Temperatura ºC	86	25	224	25	186,4107
Presión atm	1	1	10	1	12

3.2.1 Análisis de sensibilidad

Para tener criterio del comportamiento de las variaciones de entrada, flujo de agua de alimentación y flujo de combustible, se realiza un análisis de sensibilidad. Para ello se analizan los siguientes rangos de trabajo:

Flujo de agua de alimentación: desde 2800 Kg/h hasta 5000 Kg/h.

Flujo de combustible: desde 200 Kg/h hasta 300 Kg/h (representando 163,6 Kg/h y 245,4 Kg/h de carbono respectivamente).

En la tabla 3.20 y la figura 3.10 se pueden observar los resultados obtenidos cuando se varía el flujo de agua de alimentación a la caldera. El calor útil presenta poca disminución, por lo que al calcular la eficiencia en la caldera manteniendo constante el calor disponible por el combustible, se obtienen valores de eficiencia con poca variación.

Tabla 3.20. Resultados al variar el flujo de agua de alimentación.

Casos	Flujo Másico de Agua (Kg/h)	Calor Útil (KJ/Kg)	Eficiencia
1	2800	2209,045	0,874771
2	3000	2208,519	0,874563
3	3044,4	2208,402	0,874517
4	3288,8	2207,758	0,874262
5	3533,33	2207,115	0,874007
6	3777,77	2206,472	0,873752
7	4022,22	2205,828	0,873498
8	4266,66	2205,185	0,873243
9	4511,11	2204,542	0,872988
10	4755,55	2203,898	0,872733
11	5000	2203,255	0,872479

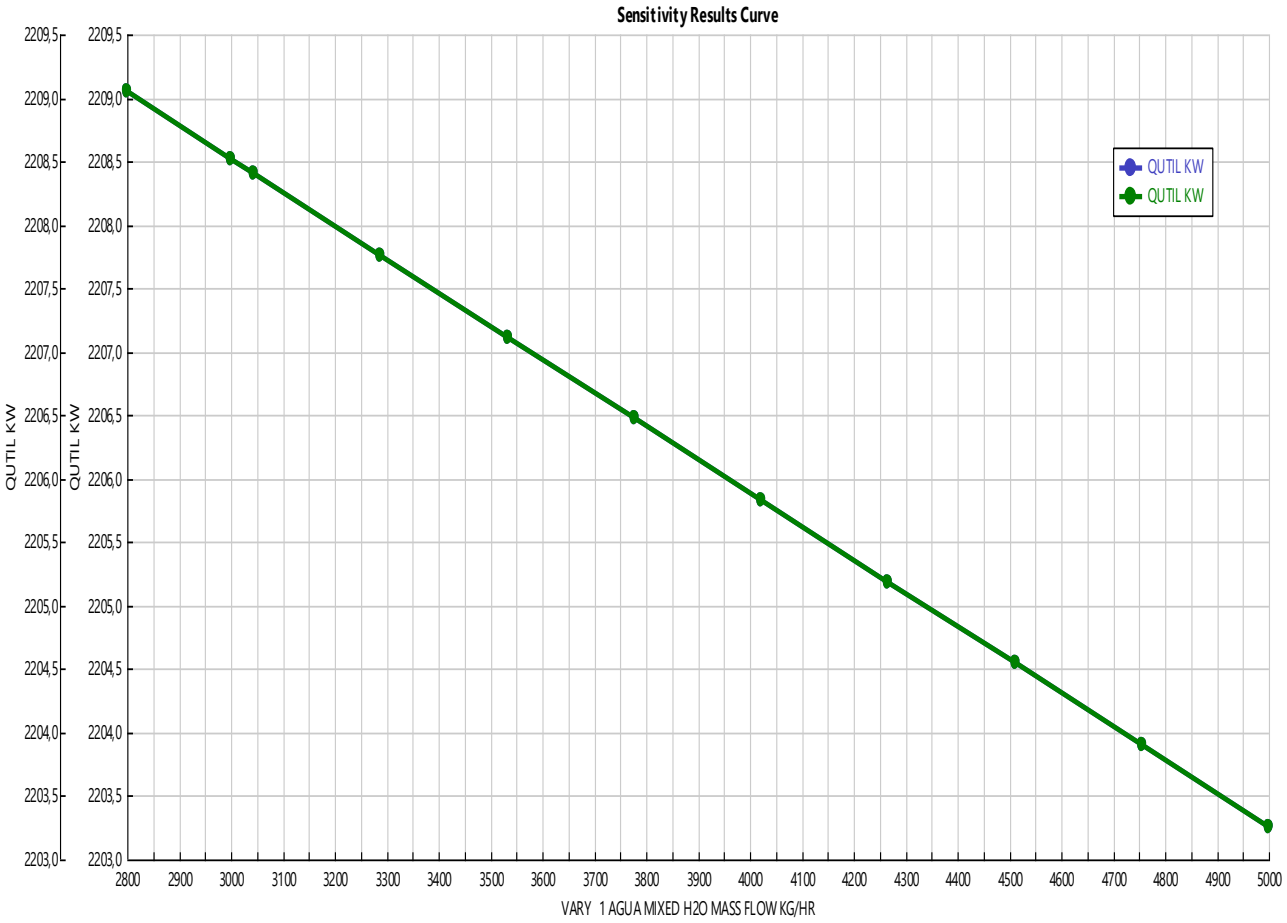


Figura 3.10 Comportamiento del calor útil al aumentar el flujo de agua de alimentación.

En la tabla 3.21 y la figura 3.11 se muestran los resultados obtenidos cuando se varía el flujo de combustible de entrada a la caldera. El calor disponible o del combustible útil se incrementa al aumentar el flujo de combustible; estos resultados están en correspondencia con el poder calórico del combustible el cual se ve favorecido en este sentido. Al calcular la eficiencia en la caldera manteniendo constante el calor útil del vapor de agua, se obtienen altos valores de eficiencia para menores cantidades de flujo de combustible, así como disminuye la eficiencia cuando se incrementa el flujo de combustible.

Tabla 3.21. Resultados al variar el flujo de combustible.

Casos	Flujo Másico de Crudo (Kg/h)	Calor Combustible (KJ/Kg)	Eficiencia
1	163,6	2235,093	0,9881
2	172,68	2324,146	0,9881
3	181,77	2413,209	0,9151
4	190,86	2502,286	0,8826
5	193,21	2525,283	0,8745
6	199,95	2591,384	0,8522
7	209,04	2680,515	0,8239
8	218,13	2769,698	0,7973
9	227,22	2858,973	0,7724
10	236,311	2948,424	0,7490
11	245,4	3038,227	0,7269

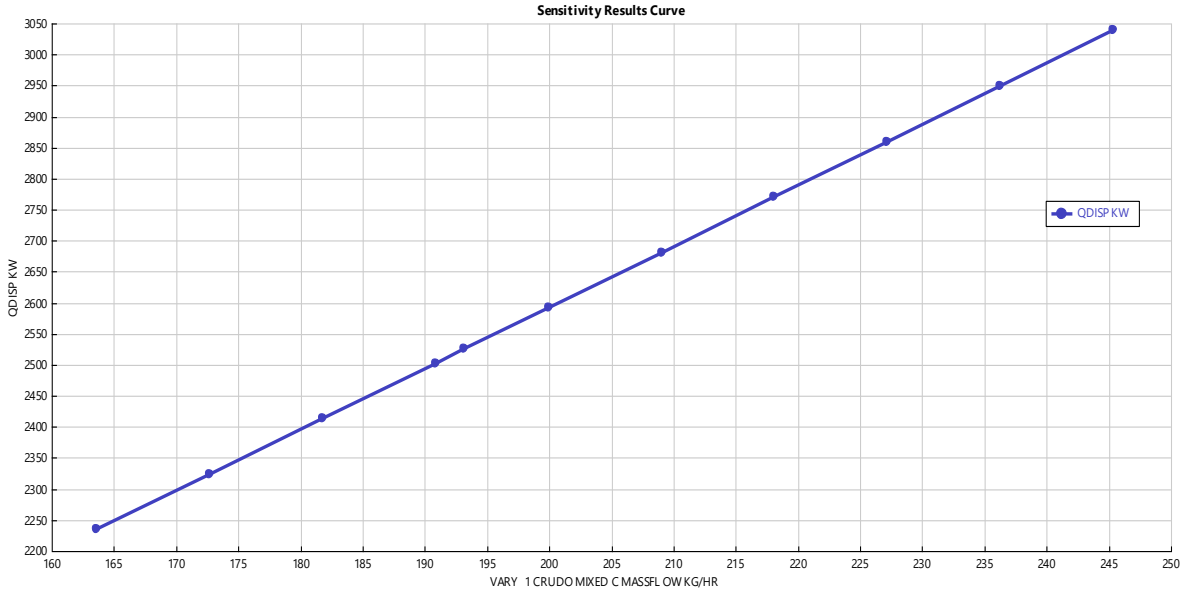


Figura 3.11 Comportamiento del calor disponible al aumentar el flujo de combustible.

En la tabla 3.22 se muestran los resultados obtenidos al combinar las dos variaciones de flujo de entrada al mismo tiempo. Se puede observar cómo, si bien incrementa la eficiencia de la caldera al aumentar los flujos se logra una estabilidad en los valores entre un 86 % y un 88%, lo cual es representativo toda vez que se logra mantener la eficiencia energética en el sistema. Es importante destacar, que la eficiencia energética se mantiene con buenos resultados (86% ± 4), al aumentar el flujo de agua de alimentación y disminuir el flujo de combustible, por lo

que beneficia la operación en el sistema de generación de vapor, así como la disminución del flujo de gases de la combustión a la salida de la chimenea.

Tabla 3.22. Resultados al variar los dos flujos de entrada.

Casos	Flujo de agua (Kg/h)	Flujo de crudo Kg/h	Calor Útil KW	Calor combustible KW	Eficiencia
1	2800	163,6	2235,093	1942,186	0,868951
2	2800	184,05	2435,477	2126,474	0,873124
3	2800	204,5	2635,945	2310,761	0,876635
4	2800	224,95	2836,642	2495,048	0,879578
5	2800	245,4	3038,227	2679,336	0,881875
6	3350	163,6	2235,093	1940,739	0,868303
7	3350	184,05	2435,477	2125,026	0,87253
8	3350	204,5	2635,945	2309,314	0,876086
9	3350	224,95	2836,642	2493,601	0,879068
10	3350	245,4	3038,227	2677,888	0,881398
11	3900	163,6	2235,093	1939,291	0,867656
12	3900	184,05	2435,477	2123,579	0,871936
13	3900	204,5	2635,945	2307,866	0,875537
14	3900	224,95	2836,642	2492,153	0,878558
15	3900	245,4	3038,227	2676,441	0,880922
16	4450	163,6	2235,093	1937,844	0,867008
17	4450	184,05	2435,477	2122,131	0,871341
18	4450	204,5	2635,945	2306,418	0,874987
19	4450	224,95	2836,642	2490,706	0,878047
20	4450	245,4	3038,227	2674,993	0,880445
21	5000	163,6	2235,093	1936,396	0,86636
22	5000	184,05	2435,477	2120,684	0,870747
23	5000	204,5	2635,945	2304,971	0,874438
24	5000	224,95	2836,642	2489,258	0,877537
25	5000	245,4	3038,227	2673,546	0,879969

Tabla 3.23. Ahorro de combustible por costo.

	Flujo de combustible (Kg/h)	Flujo de combustible (HL)	Costo de Combustible (MN)	Ahorro (MN)
	200	17520	58919760	**10310958**
Caso estudio	235	20586	69230718	

Se puede observar en la tabla 3.23 el ahorro por concepto de costo de combustible de 10298694 MN cuando se compara con el caso de estudio.

Como resultado final, también se propone elevar la altura de la chimenea de 25 a 30 m en la caldera generadora de vapor con el objetivo de favorecer el transporte y dispersión de los contaminantes, contribuyendo a elevar la calidad del aire hasta categoría de ¨Buena¨ que no provoque riesgo a la salud humana ya que en estas áreas la densidad de población es baja.

3.3 Evaluación económica del diseño de la columna recuperadora.

Para determinar los costos totales de inversión en la columna recuperadora se tuvo en cuenta, los costos de equipamiento e instalación de la columna, para ello se tuvo en consideración la figura A-35 del (Peters and Timmerhaus, 2002) para el costo original, este se determina con los datos de diseño mostrado en el **Anexo 7.**

Para actualizar el costo se tuvo en cuenta los índices de costo de la (Engineering, 2008) y los índices de costos actualizados de la (Engineering, 2018), según las ecuaciones:

Costo actualizado = Costo original *(Ia/Io)

Índice de Costo (2002) = 395,6

Índice de Costo (2017) = 576,4

Tabla 3.24. Costo del equipo.

Equipos	**Costo original ($)**	**Costo actualizado ($)**
Columna	15000	21855,41
Costo Total ($)	**21855,41**	

Se procede al cálculo del costo total de inversión, integrado por los parámetros necesarios en dependencia del costo del equipamiento tecnológico, que permitirán conocer el desembolso necesario para llevar a cabo el proyecto.

Costo de la planta=CD+CI

Capital Fijo Directo=CP+ Contratistas+ Contingencias

Costos Totales de Inversión=CFD+CT

Tabla 3.25. Costo total de inversión

	Índice (%)	**Costo $**
Costo de equipamiento		21855,41
Instalación de equipo	0,27	5900,96
Instrumentación y control	0,36	7867,94
Instalación de tuberías	0,68	14861,67
Construcción	0,18	3933,97
Costos Directos		56824,06
Ingeniería y supervisión	0,33	7212,28
Gastos de construcción	0,41	8960,71
Costos indirectos	**16173,003**	
Derechos de contrato	0,05	3649,85
Contingencia	0,1	7299,70
Otros Componentes		
Costo fijo de inversión		83946,62
Inversión de trabajo	0,74	16173,003
Costo Total de inversión	**100119,631**	

Tabla 3.26. Consumo y costos de Materias primas.

Costos	**Precio**	**Costo ($/año)**
Alcohol Técnico B ($/HL)	103	13158250,00
Agua ($/HL)	0,231	151,77
Total	**13421569,80**	

Tabla 3.27. Costos Totales de Producción.

Elementos de Costo	**Índice (%)**	**Costo ($/año)**
Materias Primas		**13421569,8**

Mano de Obra		12000
Supervisión	0,1	1200
Utilidades		16232
Mantenimiento y Reparaciones	0,02	2002,39
Suministros	0,1	200,24
Cargos de laboratorio	0,05	600,00
Costos variables		13453804,43
Depreciación		6674,64
Impuestos	0,01	1001,20
Seguros	0,04	4004,79
Costos Fijos	**11680,62**	
Costos exteriores	0,05	760,12
Costos de fabricación		13466245,18
Administración	0,15	2280,36
Distribución y Venta	0,02	290049,24
Investigación y desarrollo	0,05	725123,09
Gastos Generales	**1017452,68**	
Costos Totales de Producción	**1017452,68**	

Al definir los Costos Totales de Producción se determinaron los Indicadores Dinámicos de Rentabilidad para chequear la factibilidad.

Los indicadores dinámicos para el análisis de inversiones son los siguientes:

- Valor actual neto (VAN).
- Tasa interna de retorno (TIR).
- Período de recuperación al descontado (PRD).

Estos métodos se complementan y no son excluyentes entre sí, de ahí la conveniencia que en la práctica no se aplique uno solo de ellos sino varios de manera conjunta. El valor actual neto o valor capital de una inversión es el valor actualizado de todos los flujos de caja esperados; las ventajas de este indicador son: considera el valor del dinero en el tiempo, expresa de forma absoluta los rendimientos del proyecto y tiene carácter aditivo. La tasa de rendimiento interna es el tipo de descuento que hace equivalente los valores actuales de los

flujos netos y del costo de inversión, ofrece la oportunidad de conocer el rendimiento en términos relativos (%) o la riqueza máxima prometida que puede brindar el proyecto de inversión. El criterio del PRD expresa el momento exacto en que se recupera la inversión, es efectivo pues considera el valor del dinero en el tiempo. El mejor proyecto es el que tenga un menor valor de (PRD) período de recuperación al descontado.

Tabla 3.28. Indicadores dinámicos para el análisis de la inversión.

VAN	$96.414,28
TIR	40%
P.R.D (años)	2

La figura 3.9 se muestra la curva de trayectoria de los flujos de efectivo del proyecto, demostrando el tiempo de recuperación del mismo, y los flujos de años de explotación que proporcionan rentabilidad.

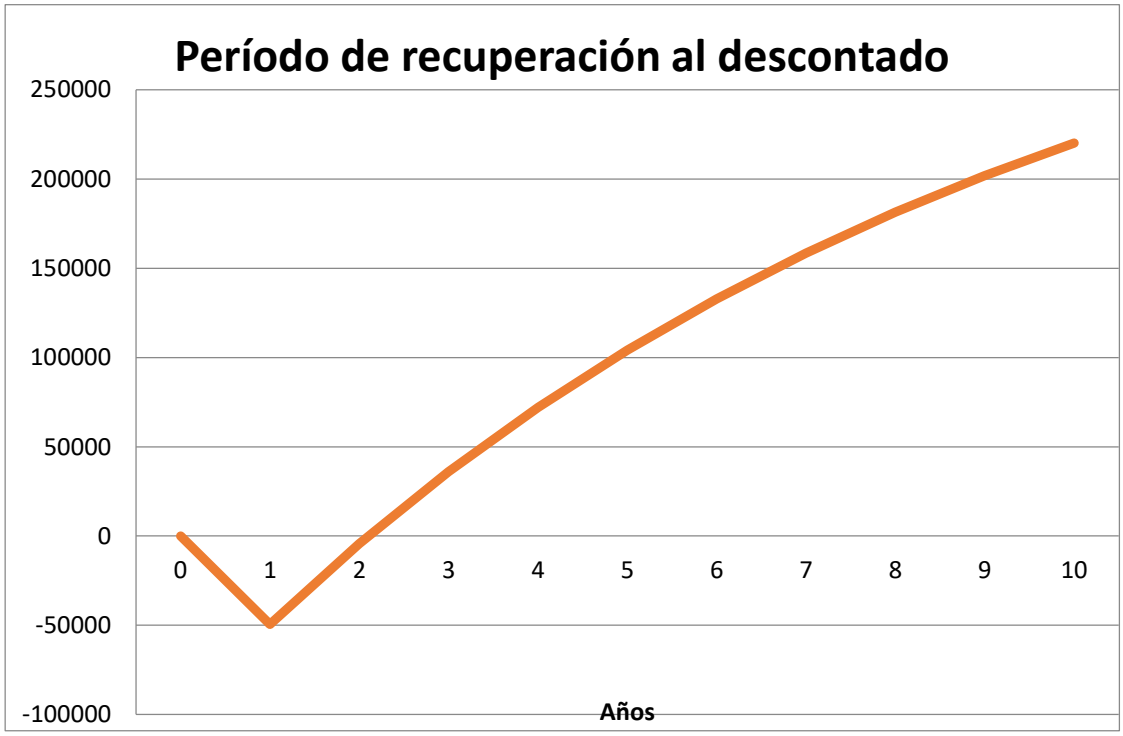


Figura 3.9 Perfil del VAN.

Conclusiones

1. El Análisis Complejo del Proceso de rectificación de alcohol permitió, partiendo de un diagnóstico integral, detectar las principales fortalezas, debilidades y punto débiles, así como definir la evaluación de diferentes alternativas tecnológicas.
2. Del diagnóstico general en la planta se obtuvieron que los principales problemas que afectan la eficiencia y estabilidad en el sistema se deben fundamentalmente a las variaciones en las composiciones de las flemas, así como el uso del crudo cubano, y a la no cuantificación de los balances de masa y energía en el sistema de generación de vapor.
3. La propuesta tecnológica de una columna recuperadora al sistema de rectificación, con ayuda de la simulación, obtuvo un diseño de una columna de 20 platos, con una altura de 5 m y 1 m de diámetro aproximadamente.
4. La incorporación de la columna recuperadora al proceso instalado, ofrece ventajas significativas, al mismo tiempo corrobora la importancia del sistema completo de rectificación de alcohol, incrementa el porciento de Alcohol Fino A en la salida, disminuye casi a cero la composición de alcohol en el residuo a la salida y logra mayor eficiencia en la eliminación de las impurezas.
5. La evaluación del sistema de generación de vapor, mediante la simulación permitió establecer la cuantificación de los balances de masa y energía, el estudio del comportamiento de las diferentes variables, así como determinar la eficiencia de la caldera en el orden del 87% considerándola adecuada de acuerdo a las condiciones de operación reales.
6. Las propuestas de alternativas tecnológicas en el sistema de generación de vapor consisten en: elevar la altura de la chimenea para favorecer el transporte y dispersión de los contaminantes, contribuyendo a elevar la calidad del aire y aumentar el flujo de agua de alimentación con disminución paulatina del combustible.
7. La alternativa de incorporación de una columna recuperadora en el sistema de rectificación resulta factible técnico y económicamente con un VAN positivo, una TIR de 40% y PRD de 2 años.

Recomendaciones

- Establecer con los suministradores, TECNOAZUCAR, normas de calidad de las materias primas, las cuales no excedan de los límites históricos, por ejemplo, que la suma de los alcoholes superiores no exceda los 300 mg/la.
- Establecer un buen control operacional en el sistema de generación de vapor de manera que, partiendo de los resultados obtenidos en el trabajo, permitan la cuantificación de los indicadores y las variables en el sistema.
- Que se consideren los resultados obtenidos en el presente trabajo, en la planta de rectificación de alcohol.

Bibliografía

ABARCA, P. 2016. Descripción de Calderas y Generadores de Vapor. *ACHS.* Colombia.

ACOSTA, C. 2012. *Evaluación de la fermentación alcohólica para la producción de hidromiel.* Universidad nacional de Colombia.

ASTM 2005. American Society for Testing and Materials.

ATSDR 2013. ToxFAQs™ para óxidos de nitrógeno, monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno.

BECERRA, J. & GUTIERREZ, I. 2013. *Sistema de plantas de tratamientos de aguas residuales en Colombia.*, Colombia.

CAMPA, N. 1996. Importancia de la destilación de alcohol en la corporación cuba-ron. S.A.

CASTILLO, Y. 2011. *Destilación multicomponente.* Universidad de los Andes

CERVANTES, Y. 2010. *Análisis del comportamiento de la etapa de fermentación alcohólica en la destilería ALFICSA.* Marta Abreu de Las Villas.

COMPANIONI, H. 2017. Producción de derivados de la caña de azúcar. *Granma*.

CHEMISTRY, R. S. O. 2015. Ethanol. *Recuperado de chemspider.com.*

DATABASE, P. C. 2017. National Center for Biotechnology Information.

DÍAZ, M., PÉREZ, I. & POLO, G. 2016. Estudio de factibilidad para la instalación de una destilería de etanol en Atencingo. México, Estado de Puebla.

DIER, P. 2012. Destilation.

DOMÍNGUEZ, F. J. 2009. Introducción a la simulación.

ECURED 2016. Enciclopedia colaborativa cubana. Holguín: Cuba.

EMASER 2012. Soluciones textiles. La baileta.

ENGINEERING, C. 2008. Chemical Engineering Plant Cost Index. august 4

ENGINEERING, C. 2018. Solids sampling and Flow: Doing the Math.

EPA 2012. Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources. United States.

ESPINAL, V. & JIMENEZ, R. 2009. *Diseño, construcción y validación de un equipo de destilación de alcohol etílico.* Universidad de El Salvador.

FERNÁNDEZ, T. 2010. *Evaluación de la capacidad fermentativa de diferentes organismos, para la producción de etanol celulósico* Universidad de Matanzas.

FORTE, J. 2005. Guía Práctica para la Simulación de Procesos Industriales. *In:* MURCIA, C. T. D. M. Y. L. M. D. L. R. D. (ed.). España.

GEANKOPLIS, C. 1998. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias* México, Compañía Editorial Continental, S.A. De C.V.

HEI 2014. Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia: a literature review. Boston: Health Effects Institute.

IPCC 2015. Fourth Assessment Report (Informe sobre el Cambio Climático de la ONU).

KEENAN, J. H. 1988. *Thermodynamic Propierties of Water Including Vapor, Liquid and Solid Phases.*

LÓPEZ, N. 2005. *´´Alternativas de obtención de productos de alto valor agregado a partir de bioetanol a partir de técnicas de destilación´´.* Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

LLANES, L. L. 2010. *Intensificación del proceso de producción de Alcohol Fino A en la destilería Agustín Rodríguez Mena en la Ronera Central.* Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

MARRERO, M. 2010. *Destilación. Determinación del grado alcohólico.* Universidad católica Andrés Bello.

MC CABE, W., SMITH, J. & HARRIOT, P. 2001. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*.

MONDEJA, D. 1987. ´´ *Termodinámica para Ingenieros Químicos´´*.
MONTAYA, A. 2012. *Diseño de una columna de destilación para recuperar una sustancia termosensible* Académica, Universidad Católica del Valparaíso.
NC-111 2004. Calidad del Aire - reglas para la Vigilancia de la calidad del Aire en Asentamientos Humanos.
NC-792 2015. Alcohol Etílico - Requisistos.
NC-1020 2014. Calidad del aire.
NUÑEZ, A. 2015. Generador de vapor en los centrales nucleares.
ORDÓÑEZ, M. 2014. Tipos de combustibles. Madrid.
OROZCO, W. 2010. *Destilación al Vacío de Etanol utilizando bomba chorro.*
PATIÑO, L., SAAVEDRA, A. & MARTÍNEZ, J. 2014. *Extracción por arrastre de vapor de aceite esencial del romero.* Universidad Mayor Real y Pontifica de San Francisco
PEDRONI, J. 2014. El destilador molecular y sus aplicaciones. *General Paurano* [Online].
PÉREZ, A. 2013. Fundamentos de procesos de destilación.
PETERS, M. S. & TIMMERHAUS, K. 2002. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers,* University of Colorado.
PONS, A. 1990.
Termodinámica Técnica para Ingenieros Químicos.
ROCHE, A. R. 1988. Métodos aproximados de diseño y modelación de equipos de destliación.
ROMERO, O. 2017. *Aplicación del Análisis Complejo de Procesos al sistema tecnológico de la destilería Agustín Rodríguez mena de la Ronera Central.* Marta Abreu de Las Villas
ROSABAL, R. F. P. 2013. *Diseño de la investigación de evaluación efectiva del complejo catalizador efymol+ en la productividad de la fermentación alcohólica de melaza.* Universidad de San Carlos de Guatemala.
STANLEY, E. 2015. Introducción a la química ambiental.
SUÁREZ, E. & OLAZÁBAL, G. 2012. El Análisis Complejo de Proceso. Su lugar en la Industria Química Actual. Feijóo ed. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara.
SUÁREZ, E., SCHUART, L. & MORALES, M. 2007. Aplicación del análisis de procesos a la asimilación de nuevas tecnologías en el caso de alto deterioro de la instalación. *Tecnología Química,* XXVII.
TREYBAL, R. 1985. *Operaciones de Transferencia de Masa*.
VARONA, J. 2014. Generadores de Vapor y Caldera.
VIAN, A. & M, R. 2008. *Destilerías y Licores (online)* [Online]. Madrid, España. Available: http://www.canalsocial.net.
WIKIPEDIA 2017. Wikipedia.
ZAPATA, N. & GALVIS, L. 2013. *Wastewater Treatment.* Maestría, Cambridge.
ZAVALETA, J. 2007. *Cooling a tower.* Maestría, Cádiz.

Anexos

Anexo 1: Especificaciones del crudo cubano.

Cupet Dirección Técnica	**MINISTERIO INDUSTRIA BASICA** **UNION CUBAPETROLEO** **MANUAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD** ***Especificaciones de productos combustibles***	Cód.: **DT-GC/C 0702** Rev.: **01** Pág.: **57 de 57**

PRODUCTO: ***PETROLEO CRUDO NACIONAL***			***CÓDIGO: 2202000014***
ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO (3)			
INDICES DE CALIDAD	**U/M**	**METODO DE ENSAYO**	**VALOR ESPECIFICADO**
1-VISCOSIDAD A 50 ºC	mm^2/s	ASTM D 445, D 88	1400 máx
2-AZUFRE TOTAL	% m/m	ASTM D129, D1552, D4294, D2622	8.0 máx
3-TEMPERATURA DE INFLAMACION PM CC	ºC	NC ASTM D 93	Ambiente
4-TEMPERATURA DE FLUIDEZ	ºC	ASTM-D 97	+ 15 máx
5-CARBON CONRADSON	% m/m	ASTM D 189, D 4530	15 máx
6-DENSIDAD A 15 ºC	g/cm^3	ASTM-D 1298, D 5002	0.9994 máx (1)
7-GRAVEDAD A 15 ºC	ºAPI	ASTM-D 1298, D 287, D 5002	10 mín (1)
8-VALOR CALORICO NETO	kcal/kg	ASTM-D 240, D 4868	9000 mín
9-AGUA POR DESTILACION	% v/v	NC ASTM D 95	2.0 máx
10-SEDIMENTOS POR EXTRACCION	% m/m	ASTM D 473	0.15 máx
11-CENIZAS	% m/m	ASTM D 482	0.10 máx
12-ASFÁLTENOS	% m/m	IP 143	18 máx
13-VANADIO	ppm	D 5863, D 5708	150 máx
14-SODIO	ppm	ASTMD D 5863, D 1318, D 5708	280 máx
15-ALUMINIO + SILICIO	ppm	ISO 10478	80 máx
16-SULFURO DE HIDRÓGENO	ppm	IP 399	5 máx
18-ADITIVOS (2)			

OBSERVACIONES:
(1)SE PODRÁN APLICAR OTROS LÍMITES, DE COMÚN ACUERDO CON EL CLIENTE.
(2)CONTIENE SECUESTRANTE DE SULFURO DE HIDRÓGENO, EN LA PROPORCIÓN APROBADA SEGÚN EL TIPO DE ADITIVO. SE REPORTARÁ EL TIPO Y LA DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO UTILIZADO, EN LA DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD DEL LOTE.
(3) EN CASO DE DISCREPANCIAS, LA EVALUACION DEL CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES SE REALIZARA SEGÚN ASTM-D 3244.

ÍND. GEN./ CAP III

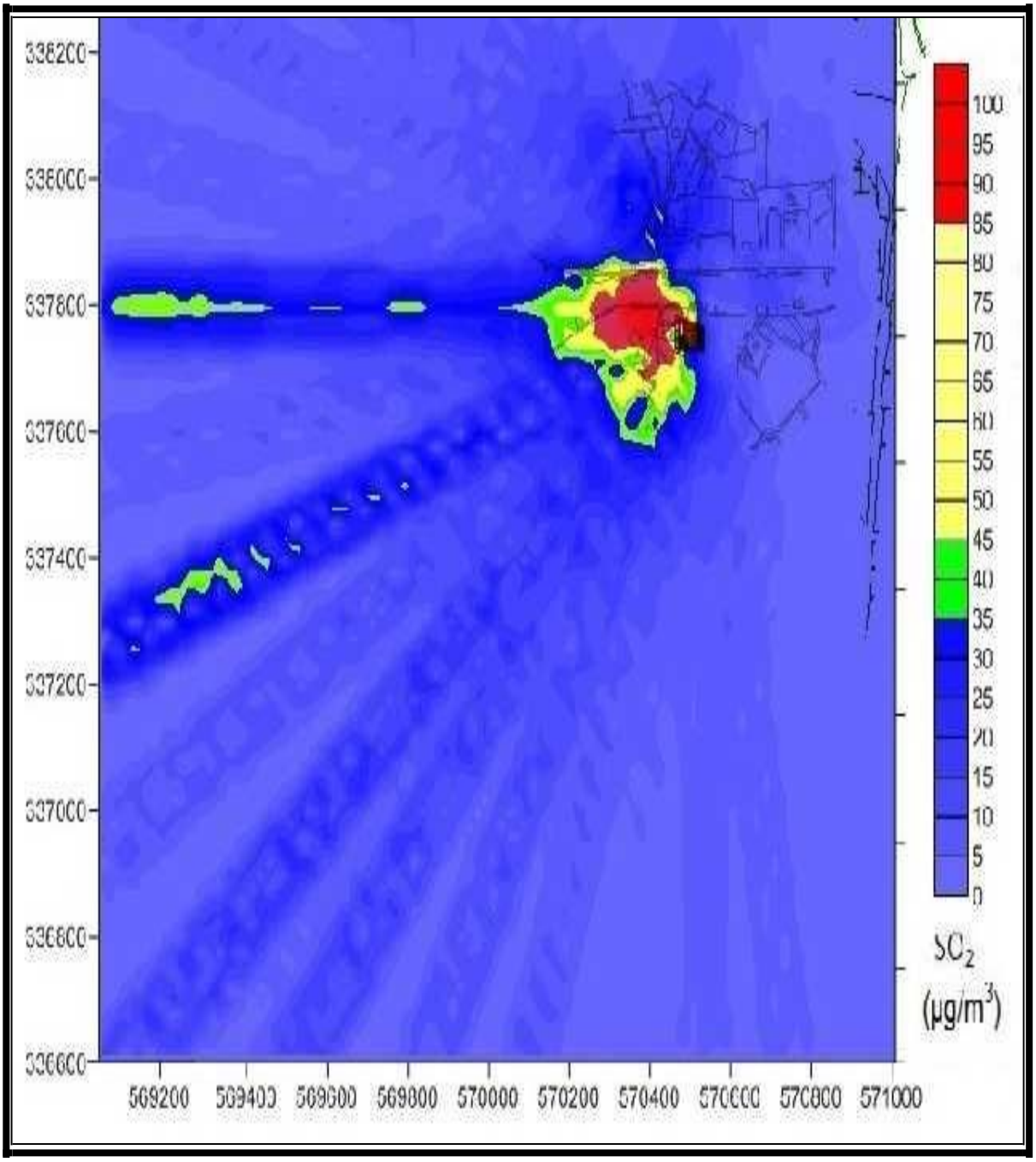
Anexo 2: Sistemas auxiliares instalados en el proceso de rectificación de alcohol.

Anexo 3: Información de las NC para la evaluación de la calidad del aire.

% de la Cm de la Cma según (NC 1020: 2014)	Categoría de Calidad de Aire (NC 111: 2004)	Escala de colores en mapas de	Valore				
			SO_2	NOx	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
0 - 79	Buena		35,5	31,6	6320	39,5	19,7
80 - 99	Aceptable		44,5	39,6	7820	49,5	24,7
100 -199	Deficiente		85,5	76,0	1520	95,0	47,5
200 - 299	Mala		130,5	116,0	2320	145,0	72,5
3 - 499	Pésima		220,5	196,0	3920	245,0	122,5
5 ó superior	Crítica		225,0	2000	4000	250,0	125,0
Concentración máxima admisible (Cma)			**45**	**40**	**8000**	**50**	**25**

Cm: Concentración máxima medida o estimada.

Anexo 4: Dispersión del SO2 en 24 horas emitido por la caldera generadora de vapor.



Anexo 5: Leyenda.

η: Eficiencia energética.

Q_1: Cantidad de vapor producido.

Q_d: Calor disponible.

Q_g: Calor ganado.

Q_c: Calor cedido.

hv: Entalpía del vapor producido evaluada a (T) y (P).

haa: Entalpía del agua de alimentación evaluada a (P) y (taa).

taa: Temperatura del agua alimentada al generador de vapor.

mc: Cantidad de combustible quemado.

Me: Flujo másico de las extracciones continuas.

hf: Entalpía del agua saturada evaluada a la presión de trabajo del Generador de Vapor.

Wv: Cantidad de vapor producido.

tv: Temperatura del vapor.

Pv: Presión del vapor.

ta: Temperatura del agua.

Pa: Presión del agua.

Pc: Poder calórico del combustible.

CA: Calidad del Aire.

SO_2: Dióxido de Azufre.

NO_x: Óxidos de Nitrógeno.

CO: Monóxido de Carbono.

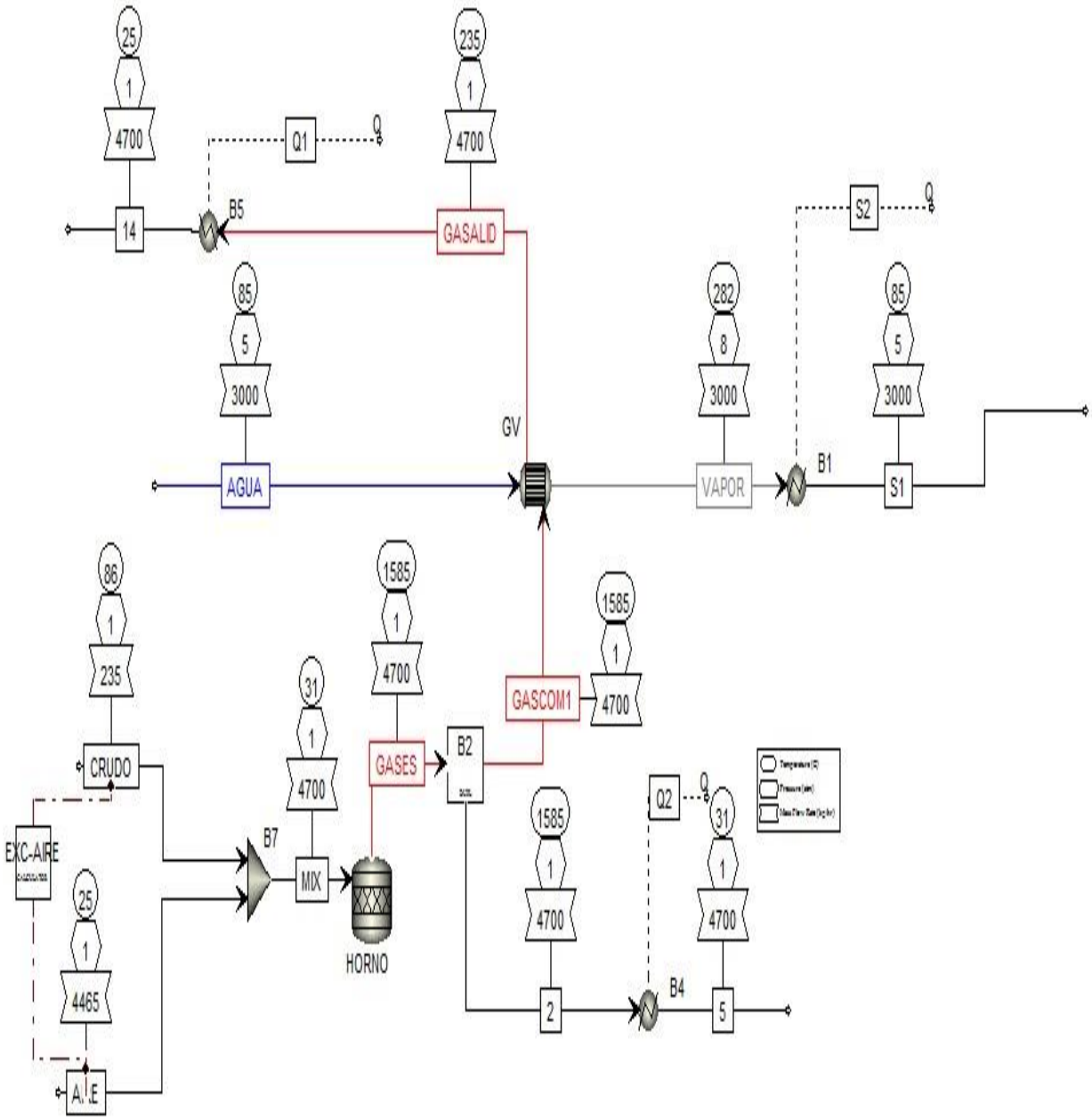
PM_{10}: Material particulado con diámetro aerodinámico de 10 µm o menos, conocidas como partículas torácicas.

$PM_{2,5}$: Material particulado con diámetro aerodinámico de 2,5 µm o menos, conocidas como partículas respirables.

CO_2: Dióxido de Carbono, es uno de los gases de efecto invernadero (G.E.I.)

CO_2Eq.: Dióxido de Carbono equivalente, es el término que se emplea para cuantificar la sumatoria de los valores del CO 2,5 veces los NOx y 3 veces el CO.

Anexo 6: Diagrama de Generación de Vapor con las correspondientes herramientas de cálculo para el ajuste del modelo.



Anexo 7: Costo para el cuerpo de la columna.

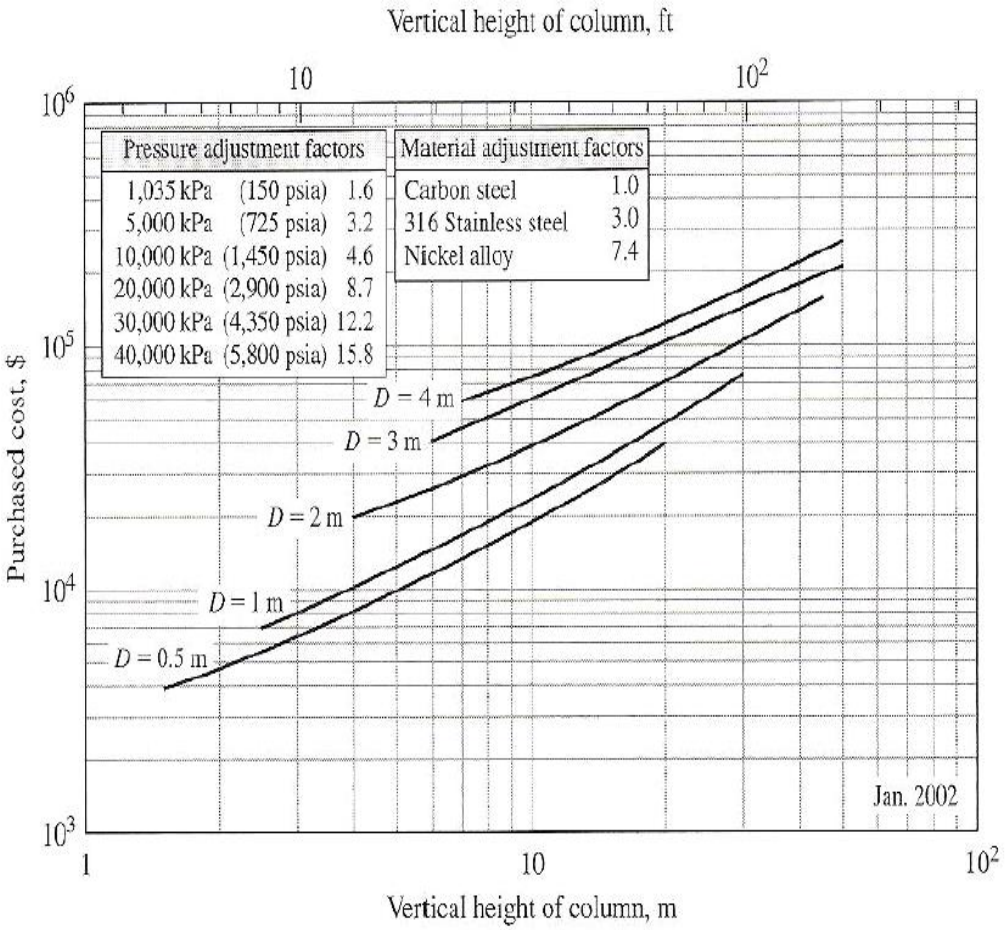


Figura A.35 Columnas. El costo es sólo para el cuerpo de la columna