

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Producciones más Limpia

Título: Recuperación del condensado que se genera en el proceso de aceite destilado en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”

Autor: Ing. Jayro Mesa Sotolongo

Matanzas, Cuba. 2020

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Producciones más Limpia**

Título: Recuperación del condensado que se genera en el proceso de aceite destilado en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”

Autor: Ing. Jayro Mesa Sotolongo

Tutor: Dr. C Lourdes Yamen González Sáez

Matanzas, Cuba. 2020

«Nuestro deber de productores es dar a nuestro pueblo lo mejor que podamos, lo mejor de nuestro esfuerzo convertido ya en productos de la mejor terminación y de la mejor calidad».

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'JMS'.

Dedicatoria

Dedico este trabajo: a mis padres, mi esposa, mis hijos y a todas esas personas que de una forma u otra pusieron su granito de arena para que la realización de este proyecto fuese posible.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a:

- Mis profesores y especialmente a Lourdes por enseñarme a ser mejor como persona y por la paciencia que han tenido conmigo.
- Mi tutora Lourdes González por ayudarme, por su preocupación y paciencia.
- A todos los trabajadores de la UEB Combinado Industrial "Héroes de Girón"
- Mi esposa e hijos.
- Y a todas esas personas que estuvieron presente en la elaboración de este proyecto.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo se realiza en la línea de obtención de aceite destilado de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” de Jagüey Grande, Matanzas. Esta UEB es la mayor planta procesadora de frutas cítricas del país para la producción de jugos concentrados, jugo simple y aceite esencial exprimido en frío y destilados de naranja, toronja y limón. En el trabajo se propone el aprovechamiento del condensado del proceso de aceite destilado como opción de Producción Más Limpia (PML), aplicando la metodología del PNUMA. Para la recuperación del destilado se diseña un sistema de flujo, el cual requiere 4,38 m de carga de bombeo y proporciona 2,682 m de pérdidas por fricción totales. Se selecciona una bomba centrífuga Tipo ENR, modelo (32-125A) a 1450 rpm, suministrado por EBARA EMICA que satisface los requerimientos técnicos operacionales del sistema. Se aprovecha la capacidad energética del condensado en el propio proceso, con la propuesta de instalación y evaluación de un Intercambiador de calor existente en la UEB, el cual garantiza un 3,8 % de sobrediseño y criterios de adaptabilidad adecuados para su uso (factor de obstrucción, coeficientes de transferencia y caída de presión). La factibilidad económica de la opción propuesta queda validada mediante los indicadores VAN (\$1911), PRI (0,73 años), TIR (12 %) y el Retorno de la Inversión (67,6 %).

ABSTRACT

This work is carried out in the line for obtaining distilled oil of the Combinado Industrial UEB “Héroes de Girón” in Jagüey Grande, Matanzas. This UEB is the largest citrus fruit processing plant in the country for the production of concentrated juices, simple juice and cold-squeezed essential oil and orange, grapefruit and lemon distillates. The work proposes the use of the condensate from the distilled oil process as a Cleaner Production (CP) option, applying the UNEP methodology. For the recovery of the distillate, a flow system is designed, which requires 4.38 m of pumping head and provides 2.682 m of total friction losses. A Type ENR centrifugal pump, model (32-125A) at 1450 rpm, supplied by EBARA EMICA, is selected to satisfy the technical operational requirements of the system. The energy capacity of the condensate is used in the process itself, with the proposal of installation and evaluation of an existing heat exchanger in the UEB, which guarantees 3.8% overdesign and suitable adaptability criteria for its use (factor of clogging, transfer coefficients and pressure drop). The economic feasibility of the proposed option is validated by the VAN (\$ 1911), PRI (0.73 years), IRR (12%) and Return on Investment (67.6%) indicators.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	3
1.1. Concepto de producción más limpia	3
1.2. Orígenes de la red nacional de producción más limpia (RNPML)	5
1.3. Principio, beneficios y dificultades de la producción más limpia.....	5
1.3.1. Principio de la producción más limpia	5
1.3.2. Beneficios de la producción más limpia.....	6
1.3.3. Dificultades para la implementación de la producción más limpia	7
1.4. Metodología de producción más limpia.....	8
1.5 Industria de los aceites esenciales.....	11
1.5.1. Aplicación y Usos de los aceites esenciales.....	12
1.5.2. La destilación por vapor de agua	13
1.5.3. Recuperación de agua en el proceso de recuperación de aceite	14
1.6. Intercambiadores de calor	15
1.6.1. Tipos de intercambiadores de calor.....	15
1.6.2. Diseño y evaluación de intercambiadores de calor.....	17
1.6.3. Análisis de apreciación de un Intercambiador de calor existente.....	20
1.6.4. Ensuciamiento u obstrucción de intercambiadores de calor	20
1.7. Conclusiones parciales.....	21
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1 Planeación y organización	22
2.1.1 Compromiso y organigrama de la UEB.....	22
2.2 Evaluación previa.....	22
2.2.1 Caracterización de la UEB y descripción del proceso tecnológico	22
2.2.2 Diagnóstico ambiental	22
2.3 Evaluación y estudio de factibilidad.....	23
2.3.1 Identificación y propuesta de la opción de producción más limpia	23
2.3.2. Evaluación de la factibilidad técnica de la propuesta	23
2.3.3 Evaluación de la factibilidad económica de la propuesta	40
2.3.4 Factibilidad ambiental de la propuesta.....	42
2.4 Implementación.....	42
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
3.1. Etapa de planificación y organización	43
3.2. Etapa Pre-evaluativa.....	43
3.2.1 Caracterización de la EUB.....	44
3.2.2. Descripción del proceso tecnológico.....	45
3.2.3. Diagnóstico ambiental	47
3.2.4. Identificación de los problemas técnico-ambientales	48
3.3 Etapa de evaluación y estudio de factibilidad.....	48
3.3.1 Propuesta de la opción de producción más limpia	48
3.3.2 Evaluación técnica de la propuesta	49
3.3.3. Factibilidad económica de la propuesta	59
3.3.4 Beneficios ambientales de la propuesta.....	61
3.4 Conclusiones parciales	61
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	64
ANEXOS.....	70

INTRODUCCIÓN

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Combinado Industrial “Héroes de Girón” procesa más del 60 % de todos los cítricos cubanos dedicados a la producción de jugos y otros subproductos, cosechados por la Empresa de Cítricos “Victoria de Girón”. Su misión fundamental es producir alimentos de la más alta calidad en completa armonía con el medio ambiente, con honestidad y respeto a los clientes. Su principal producción son los jugos simples, concentrados congelados y asépticos de naranja, toronja y piña. Además, se producen aceites esenciales y destilados derivados de la naranja y la toronja, pulpas, pastas, néctares y conservas de frutas tropicales (mango, guayaba, y tomate).

Por la importancia que tiene el tema de la Producción Más Limpia (PML) en esta Empresa se realizan grandes esfuerzos para implementar este tipo de estrategia y lograr con ella la eliminación de contaminantes en el origen y un ahorro de agua, energía, materia prima y por lo tanto un aumento de la eficiencia. Por otro lado, es una forma de pensar en cómo producir bienes y servicios con mínimo impacto ambiental, bajo las limitaciones tecnológicas y económicas actuales.

La Empresa, a pesar de ser eficiente, posee etapas del proceso productivo donde aún se generan corrientes residuales, de las cuales no son aprovechadas sus potencialidades energéticas y las facilidades auxiliares que pudieran reportar. Pequeñas modificaciones técnicas-operacionales en el proceso pudieran incrementar su eficiencia, disminuir los costos de producción y aumentar las ganancias. Es el caso del condensado que se genera en el proceso de obtención de aceite destilado, el cual sale de la etapa de destilación con un alto contenido energético y actualmente es vertido junto a las aguas residuales de la Empresa.

Según lo anterior se plantea como **problema científico**: ¿Cómo recuperar el condensado en el proceso de obtención de aceite destilado de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” aplicando la metodología de PML?

Hipótesis: Si se aplica la metodología de PML se podrá seleccionar la opción técnico-operacional adecuada para el aprovechamiento del condensado que se genera en el proceso de aceite destilado de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”, lo que se traduce en

una disminución de la generación de residuales líquidos, aprovechamiento de su capacidad energética en el propio proceso, y la mejora del desempeño ambiental de la entidad.

Objetivo general: Recuperar el condensado que se genera en el proceso de aceite destilado, en la etapa de limpieza de los filtros rotatorios en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”.

Objetivos específicos:

1. Proponer una opción de PML para la recuperación de la corriente de condensado en el proceso de aceite destilado de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”.
2. Evaluar técnica y operacionalmente la opción de PML, mediante el diseño de un sistema de flujo y la evaluación de un Intercambiador de calor.
3. Valorar la factibilidad económica y ambiental de la opción propuesta.

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

En el presente capítulo se realiza un análisis conceptual y bibliográfico sobre disímiles términos que fundamentan las prácticas de esta investigación, los aceites esenciales de frutas cítricas, la PML, el impacto ambiental a nivel industrial, con el objetivo de describir las principales herramientas que apoyan el desarrollo de este proyecto.

La tendencia medioambiental en la industrial ha ido desarrollándose desde una mentalidad de productores inconscientes del costo ambiental hasta una mucho más avanzada, la de PML.

1.1. Concepto de producción más limpia

El concepto de producción más limpia surge como una estrategia de prevención orientada al uso eficiente de los recursos naturales, insumos y materias primas; con el objetivo de disminuir tanto los riesgos a la salud humana como al ambiente, y al mismo tiempo mejorar la productividad y competitividad de la empresa.

A continuación se refieren algunos conceptos de producción más limpia según varios autores:

La PML puede ser aplicada a procesos utilizados por cualquier industria, a los productos mismos y a varios servicios ofrecidos en la sociedad. Es un término amplio que comprende conceptos como eco-eficiencia, prevención de contaminación y productividad verde. El objetivo de PML es lograr la reducción de los impactos ambientales del proceso productivo, enfocándose en la mejora de procesos y productos con el fin de evitar problemas ambientales antes de que estos ocurran, además de que no solo contempla la reducción de las cargas contaminantes y el uso adecuado de los recursos naturales, sino también la integración de beneficios económicos, ambientales y sociales originados como consecuencia del proceso industrial y la producción y comercialización de un producto (Paredes, 2014).

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2006) plantea que la PML puede ser aplicada a procesos utilizados por cualquier industria, a los productos mismos y a varios servicios ofrecidos en la sociedad. Es un término amplio que comprende conceptos como eco-eficiencia, prevención de contaminación y productividad verde. La aplicación de la PML protege al medio ambiente, al consumidor y al trabajador, mientras mejora la eficiencia industrial, la rentabilidad y la competitividad.

Dodic et al. (2010) plantea que la PML es uno de los instrumentos más eficaces para disminuir el riesgo que los materiales tóxicos representan para los seres humanos lo que genera una serie de beneficios para la sociedad y los empleados a partir de la disminución de la contaminación, prevención de accidentes y compromiso con el talento humano.

La producción más limpia hace referencia a una mentalidad que enfatiza la producción de nuestros bienes y servicios con el mínimo impacto ambiental bajo la tecnología actual y límites económicos. Reconoce que la producción no puede ser absolutamente limpia. La realidad práctica asegura que habrá residuos de algún tipo, de varios procesos y productos obsoletos.

Hernández (2013) plantea que la producción más limpia es: la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada en los procesos, productos y servicios a fin de aumentar la eficiencia y reducir el riesgo para los humanos y el medio ambiente a partir de las opciones de P+L que se pueden clasificar en: buenas prácticas operativas, sustitución de materiales, cambios tecnológicos, reciclaje interno, rediseño de productos, reciclaje externo.

Severo et al. (2015) la define como una estrategia que posibilita la inserción de la gestión ambiental en el contexto de las organizaciones bajo una perspectiva sistémica de producción, aplicable a procesos, productos y servicios de cualquier tipo de industria, que le permite a las organizaciones, hacer uso eficiente de insumos y energía en el desarrollo de los procesos, lo que conlleva a un aumento de la productividad, competitividad y el mejoramiento del rendimiento organizacional, además de que requiere migrar de un enfoque operativo a una orientación de negocios.

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO]; United Nations Environment Programme [UNEP] (2010), Li y Hamblin (2016), Luken et al.(2015) y Cardoso et al. (2016) coinciden en el criterio que la producción más limpia es una estrategia de carácter preventivo que genera mejoras en el desempeño ambiental, social, económico y competitivo.

En general, el autor coincide en considerar que la PML encierra la preservación de las materias primas, la energía y el agua, también proporciona la disminución de las sustancias tóxicas, aguas residuales y la toxicidad de todas las emisiones al a la atmósfera y de los residuos. Por lo que tiene como objetivo minimizar todos los impactos durante el ciclo de vida del producto, desde que comienza la extracción de las materias primas hasta que se llega al residuo final y presume la introducción de aspectos medioambientales en el diseño y distribución de los servicios.

1.2. Orígenes de la red nacional de producción más limpia (RNPML)

En Cuba, la Red Nacional de producción más limpia (RNPML) fue establecida en mayo del 2001 también dentro del marco del Programa Internacional de PML desarrollado por ONUDI y con el apoyo financiero del Gobierno de Austria y actualmente forma parte de la Red Latinoamericana. Comenzó con tres puntos focales establecidos en el Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia (IIIA), el Instituto de Investigaciones para los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) y el Centro de Información y Gestión de Educación Ambiental (CIGEA-AMA) pertenecientes a los entonces Ministerios de la Industria Alimenticia, Industria Azucarera y la Agencia de Medio Ambiente respectivamente. A mediados del 2003 se incorpora el punto focal que radica en el Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical (IIFT) y pertenece al Ministerio de la Agricultura y el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB).

Los puntos focales son los responsables de la ejecución de asesorías completas de PML, el apoyo técnico a los sectores industriales, productivos y de servicio así como la promoción de inversiones y la transferencia de tecnología. Como otra de sus funciones está la preparación de expertos nacionales para los diferentes sectores económicos. (Manual de producción más limpia en el Sector Industrial Citrícola, 2009).

1.3. Principio, beneficios y dificultades de la producción más limpia

1.3.1. Principio de la producción más limpia

Bermúdez (2013), Fernández *et al.* (2015) y Cabellos (2015) refieren que la PML posee cuatro principios básicos capaces de orientar el sentido de producción a procesos limpios:

Principio de precaución: tiene como objetivo evitar enfermedades irreversibles para los trabajadores y daños irreparables para el planeta. Así mismo este principio se preocupa de que la producción industrial tenga un impacto social.

Principio de prevención: consiste en sustituir el control de la contaminación por la prevención de la generación de residuos en la fuente, lo que evita la generación de emisiones peligrosas para el medio ambiente y el hombre, en lugar de remediar los efectos de dichas emisiones.

Principio del control democrático: considera el acceso a informaciones sobre cuestiones relativas a la seguridad y el uso de procesos y productos, para todas las partes interesadas, incluidas las emisiones y registros de contaminantes, planes de reducción de uso de productos tóxicos y datos sobre componentes peligrosos de productos.

Principio de integración: visión holística del sistema de producción de bienes y servicios, con el uso de herramientas como la Evaluación del Ciclo de vida del producto (ACV).

1.3.2. Beneficios de la producción más limpia

La implantación de la PML posee grandes beneficios para todas las empresas y especialmente para el entorno debido que esta estrategia funciona como prevención de los problemas medio ambientales. Por otra parte, esta implantación presenta algunas dificultades para que se lleve a cabo.

Según Severo *et.al.* (2015), Nadour (2012), Zeng *et.al.* (2010), McCain (2005) y Serrano *et al.* (2006) entre los principales beneficios que ofrece la producción más limpia se encuentran: ahorra costes de tratamiento de las corrientes residuales, disminuye el consumo de agua, energía y materias primas, aumenta la productividad de la empresa, conserva los recursos naturales, armoniza las actividades con el ecosistema, favorece la imagen de la empresa, incrementa los beneficios económicos, posibilita el acceso a nuevos mercados, reduce el riesgo de sanciones de la autoridad ambiental, incrementa la sustentabilidad del producto y su aceptación por el cliente, decrecimiento de costos de producción, posibilita la producción de servicios de calidad ambiental pertinentes a la demanda del mercado.

La PML favorece en gran medida, el mejoramiento de la conductas ambientales y condiciones de salud y seguridad en las organizaciones, el cumplimiento legal ambiental, la eficiencia de producción, el fortalecimiento de la competitividad empresarial, el mejoramiento de la imagen corporativa ante el sector empresarial y consumidores (Dumke *et.al.*, 2007), además de que promueve diseños amigables acorde a la necesidad de los futuros mercados permite la generación de valor económico como forma de generar bienestar para la sociedad, lo que genera una posición de ventaja competitiva.

Por otra parte según Lin *et al.* (2013), Van Berkel (2015) y Cardoso *et al.* (2016) con las opciones de Producción más limpia se logra la implementación de buenas prácticas orientadas a racionalizar el consumo de recursos, reutilizar los insumos y reemplazar materias primas tóxicas, modificación de métodos de trabajo, rediseño de servicios, incorporación de tecnologías más eficientes y menos nocivas para el medio ambiente, adopción de sistemas de gestión ambiental y el cambio de los modelos de pensamiento con relación a la gestión de los aspectos ambientales en todos los niveles y procesos de la organización.

Asimismo, mediante estudios realizados en pequeñas y medianas empresas, concluyen que la aplicación de la metodología de valor sostenible como estrategia de apoyo a la PML, genera resultados de carácter económico, ambiental y social tales como: la reducción y control de costos, incremento de las utilidades a través del uso eficiente de los recursos, reducción del consumo de recursos, implementación de mejores prácticas ambientales, diseño de servicios ambientalmente sostenibles mejora de las condiciones de salud y calidad de vida de empleados y comunidad, lo que armoniza la relación entre economía y medio ambiente, y coloca las estrategias ecológicas al servicio de los sistemas productivos (Kjaerheim, 2005; Van Hoof y Herrera, 2007).; Eg *et al.*, 2010; Henriques & Catarino, 2014; Cabello *et al.* 2015)

La evidencia empírica confirma que las técnicas preventivas de producción más limpia generan beneficios para los entes económicos y el medio ambiente (Molina *et al.*, 2015; Cabello *et al.*, 2016). El potencial de implementación de la eficiencia en el uso de los recursos se orienta a la eficiencia en el uso de la energía, el agua, clasificación de residuos y reducción de emisiones y vertimientos; lo que la convierte en la herramienta para disminuir los impactos ambientales, reducir costos, mejorar el desempeño competitivo, la imagen corporativa y la relación con las parte interesadas (Assenova *et al.*, 2016; Wahala *et al.*, 2012; United Nations Industrial Development Organization & United Nations Environment Programme, 2010).

1.3.3. Dificultades para la implementación de la producción más limpia

Roswell (2006) refiere que las principales limitaciones que se tienen a la hora de implementar las opciones de PML son:

- Falta de conciencia ambiental
- Resistencia burocrática a introducir cualquier tipo de cambio
- Falta de soporte empresarial por parte de los altos niveles de gestión
- Falta de consenso dentro de la organización
- Falta de información sobre las posibilidades y ventajas existentes en la Producción más Limpia
- Falta de una tecnología apropiada
- Desconocimiento de las tecnologías que se podrían aplicar
- Asegurar la continuidad empresarial
- Incomprensión de la reglamentación

- Prevención por parte de los responsables de investigación, desarrollo, ingeniería o producción
- Incorrecto control del programa una vez en ejecución y la falta de información sobre las ventajas que se van consiguiendo
- Incorrecta asignación de los costos de tratamiento o disposición final que no permiten reflejar las ventajas económicas
- Falta de recursos financieros

La PML surge debido a las preocupaciones con relación al cuidado del medio ambiente y las limitaciones de sus recursos naturales debido a los efectos derivados de las entidades industriales. También se comenta que la PML genera beneficios para los sectores económicos y ambientales debido que sirve como herramienta para disminuir los impactos ambientales, reducir los costos, entre otros. Se habla de que a pesar de que la PML posee grandes beneficios también posee dificultades para su implementación principalmente la falta de recursos económicos en este caso.

1.4. Metodología de producción más limpia

Aunque existen diversas metodologías todas se derivan de la desarrollada por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2006) y la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y está integrada por cinco fases, las cuales se describen a continuación:

Fase I: Planeación y organización.

Fase II: Evaluación previa.

Fase III: Evaluación.

Fase IV: Estudios de factibilidad.

Fase V Implantación.

Fase I: Planeación y organización

Involucrar y obtener el compromiso de la dirección: El compromiso de la dirección es la fuerza impulsora para el desarrollo de un proyecto de PML, pues implica disponer de recursos materiales, humanos y financieros para lograr los objetivos deseados.

Establecer el equipo conductor del proceso: Todos los departamentos afectados por la evaluación de PML deberán involucrar al menos un representante en el equipo de trabajo. Una vez organizado el equipo deberá conseguir la colaboración de todos los involucrados.

Definición de objetivos parciales y finales (metas de PML): Los objetivos se pueden definir en términos cualitativos, pero siempre que sea posible es preferible cuantificarlos. También es importante llevar a cabo revisiones periódicas de los objetivos, de acuerdo con los resultados que se vayan obteniendo.

Fase II: Evaluación previa

Desarrollo del diagrama de flujo del proceso: Los diagramas de proceso son la representación del proceso de transformación de las materias primas en productos, en el cual se identifican las distintas unidades y etapas más importantes, así como el origen, circulación y destinos de los productos, subproductos y corrientes residuales originados en la transformación principal y en las demás operaciones de; proceso, entre las que se encuentran las recirculaciones internas, los tratamientos aplicados a las corrientes residuales.

Identificación de las entradas y salidas: Se han de identificar todas las entradas de materias primas y auxiliares, incluyendo agua y energía, y su posición en el diagrama de proceso. También hay que determinar los flujos o las cantidades acumuladas para el período elegido para poder efectuar los cálculos de balance. Para las evaluaciones económicas habrá que disponer además los precios unitarios correspondientes.

Todas las salidas del proceso también deben ser identificadas. Las salidas incluyen las deseadas, las no deseadas pero inevitables y las evitables o recuperables, calificadas como productos, subproductos, corrientes residuales peligrosas o no y reciclados a un proceso exterior.

Identificación de los destinos finales: Los destinos finales de todas las corrientes para determinar su idoneidad de acuerdo con las características de las corrientes, los límites admisibles en el punto de destino y las responsabilidades del productor y del gestor externo de residuos. Asimismo, hay que obtener información sobre los costos de disposición.

Fase III: Evaluación

Completar los balances de materia y energía: Los balances de materia y energía se realizan alrededor de las unidades de proceso, agrupaciones de equipos o equipos individuales con el fin de verificar la consistencia de los datos disponibles o averiguar un dato que falta.

La conformación de un adecuado balance de masa y energía tiene como finalidad, cuantificar y detectar las áreas donde hay alguna situación anómala. Este balance sirve para

estimar los costos de operación del proceso o bien determinar las entradas y salidas no cuantificadas.

Los balances realizados alrededor de un equipo donde hay transferencia de masa o energía en alguna forma, y muy especialmente donde existen transformaciones de tipo química, permiten determinar los rendimientos reales. Estos rendimientos se comparan con los teóricos a fin de diagnosticar la eficacia del proceso de equipo y, en su caso, razonar las ineficiencias para poder determinar las medidas a tomar.

Evaluar las causas: Una vez obtenido el balance de materia y energía, este debe de ser utilizado como la herramienta básica para proporcionar las respuestas necesarias del ¿Por qué?, ¿Dónde?, ¿Cuándo? y ¿Cuánto? se generan dichas emisiones y residuos o de cualquier otra situación de interés para el equipo. Con esta base puede determinarse que variantes hay que cambiar y/o modificar para lograr una adecuada actividad productiva.

Generar opciones de PML: Si se conocen las fuentes de generación de residuos y emisiones; así como también las fuentes de desperdicio de materias primas y energéticas, se inicia la búsqueda de medidas correctivas. Esta generación de opciones será de mucha mayor riqueza si se consideran las sugerencias de todos los miembros del equipo de PML

Seleccionar las opciones de PML: Una vez que han sido generadas las opciones de PML, estas deben de ser seleccionadas, de acuerdo a los criterios de factibilidad, costos de implantación y rentabilidad. En esta etapa no deben de eliminarse ninguna opción a menos que sea obviamente NO factible y por ultimo las opciones similares deben de fusionarse.

Fase IV: Estudios de factibilidad

Evaluación preliminar: Con la finalidad de determinar la factibilidad, técnica, económica y ambiental, las opciones seleccionadas deben de ser sometidas a las siguientes evaluaciones:

- Opciones Técnicas vs. Procedimientos
- Opciones relativamente sencillas vs. Opciones complejas
- Opciones de bajo, medio o alto costo
- Evaluación técnica

En esta evaluación deben de considerarse el impacto que tendrán esas opciones en las tasas de producción, tiempos de operación, adición o eliminación de operaciones unitarias, capacitación adicional y/o cambio de personal.

Evaluación económica: La finalidad de este tipo de evaluación es determinar si las opciones a implantar son adecuadas en el sentido de dar ganancias a la empresa. La evaluación económica se hace considerando los criterios de Tasa Interna de Retorno, periodo de recuperación, evaluación ambiental, etc.

Seleccionar opciones factibles: Una vez realizadas las evaluaciones, la información recopilada para cada opción debe de ser sometida a un proceso de documentación en el cual se asienten los criterios de evaluación. La forma de seleccionar las opciones a implantar puede hacerse en base a una clasificación por puntos, ponderando cada una de las evaluaciones.

Fase V Implantación

La implantación de PML exige de un plan de aplicación de las PML el cual presenta los resultados de cada etapa y esboza un plan de acción para alcanzar las mejoras identificadas en la empresa.

El plan de aplicación debe definir claramente el tiempo, las tareas y las responsabilidades. Esto implica priorizar la aplicación de las opciones que dependen de los recursos disponibles, la preparación de las especificaciones técnicas requeridas, así como la disposición del sitio y la documentación para la licitación, etc.

Después de decidir cuales opciones de mejoras serán implantadas, hay que desarrollar los objetivos e indicadores de lo que se va a llevar a cabo para clarificar cuáles serán las expectativas del mejoramiento y como serán medidas.

En resumen, podemos plantear que una evaluación de PML tiene como objetivo principal lograr la caracterización y evaluación de oportunidades para disminuir la producción de cualquier tipo de residuos y emisiones y esto proporciona que se utilicen los recursos de forma más eficiente. Puesto que para lograr esto es necesario conocer con profundidad el proceso de producción, así como la asistencia de un grupo selecto de expertos para realizar las tareas pertinentes.

1.5 Industria de los aceites esenciales

Los aceites esenciales son compuestos formados por varias sustancias orgánicas volátiles, que pueden ser alcoholes, acetonas, cetonas, éteres, aldehídos, y que se producen y almacenan en los canales secretores de las plantas. Normalmente son líquidos a temperatura ambiente, y por su volatilidad, son extraíbles por destilación en corriente de

vapor de agua, aunque existen otros métodos. En general son los responsables del olor de las plantas (Rossiet *al.*, 2014).

Los aceites se definen según Torres (2013) como productos obtenidos a partir de una materia prima vegetal, bien por arrastre con vapor, bien por procedimientos mecánicos a partir del epicarpio de los Citrus, o bien por destilación seca. El aceite esencial se separa posteriormente de la fase acuosa por procedimientos físicos en los dos primeros modos de obtención; puede sufrir tratamientos físicos que no originen cambios significativos en su composición. Esta definición establece claramente las diferencias que existen entre los aceites esenciales oficinales (que se usa en medicina) y otras sustancias aromáticas empleadas en farmacia y perfumería conocidas vulgarmente como esencias.

1.5.1. Aplicación y Usos de los aceites esenciales

Los aceites esenciales obtenidos de la corteza de los frutos cítricos, o destilados de sus flores u hojas, han tenido gran importancia como agentes saborizantes para todo tipo de bebidas alcohólicas o no alcohólicas, panadería, caramelos, pudines, gelatinas, gomas, chicles y en la farmacia. También son usados en perfumería, cosméticos y para la fragancia de los jabones. Hay difícilmente un producto en las industrias de alimentos, bebidas, cosméticos, jabones y perfumes el cual no contenga al menos una pequeña cantidad de la deliciosa fragancia refrescante, de los aceites de cítricos. La producción y consumo de estos aceites ha alcanzado un gran volumen (Cerón, Cardona & Toro, 2012; Tovar *et al.*, 2011)

Según Y. Rueda *et al.*, 2007 los aceites esenciales poseen decímeles usos como:

Industria Alimentaria: Se emplean para condimentar carnes preparadas, embutidos, sopas, helados, queso, etc. Los aceites más empleados por esta industria son el Cilantro, Naranja y Menta, entre otros. También son utilizados en la preparación de bebidas alcohólicas y no alcohólicas, especialmente refrescos. Con respecto a esta utilidad podemos citar las esencias extraídas del naranjo, limón, mentas e hinojo, entre otros. Estas esencias también se emplean en la producción de caramelos, chocolates y otras golosinas.

Industria Farmacéutica Se usan en cremas dentales (aceite de menta e hinojo), analgésicos e inhalantes para descongestionar las vías respiratorias (eucalipto). El ecucaliptol es muy empleado en odontología. Son utilizados en la fabricación de neutralizantes de sabor desagradable de muchos medicamentos (naranjas y menta, entre otros).

Industria de Cosméticos Esta industria emplea los aceites esenciales en la producción de cosméticos, jabones, colonias, perfumes y maquillaje. En este campo se pueden citar los aceites de geranio, lavanda, rosas y pachouli.

Desodorantes Industriales Actualmente se ha desarrollado el uso de esencias para disimular el olor desagradable de algunos productos industriales como el caucho, los plásticos y las pinturas. La industria de las pinturas emplea limoneno como disolvente biodegradable. También se imparte olor a juguetes. En textiles, como enmascaradores de olores en tratamientos con mordientes antes y después del teñido. En papelería, para impregnar de fragancias cuadernos, tarjetas, papel higiénico, toallas faciales.

Industria tabacalera Demanda mentol para los cigarrillos mentolados.

En general los aceites esenciales poseen una amplia aplicación y uso en los diferentes tipos de industrias como la de cosmético, alimentaria, farmacéutica, etc.

1.5.2. La destilación por vapor de agua

El proceso de extracción de los productos implica realizar un proceso de destilación para obtener un producto más puro.

El término destilar proviene del vocablo en latín *destillarell* que no es otra cosa que la separación de una sustancia por medio del calor, para esta operación es necesario el uso de un alambique pero también puede ser extraída de forma rústica artesanal utilizando utensilios comunes de cocina. La destilación es un proceso físico pues no se produce ninguna transformación de sustancias sino una separación de algunos componentes volatilizables, desde el punto de vista de la física la destilación se define del siguiente modo: muchas sustancias de punto de ebullición muy alto, calentadas juntamente con el agua pasan a estado de vapor a la temperatura de ebullición de ésta, son por lo tanto, volátiles con el vapor de agua y pueden obtenerse y purificarse por destilación en corriente de ese vapor (Rossi *et al.*, 2011, 2014).

La destilación por vapor de agua, o arrastre por vapor de agua, es la técnica más habitual para obtener aceites esenciales. Es la única técnica autorizada por la Farmacopea Europea, junto con el prensado en frío para extraer aceites esenciales de las cáscaras de los cítricos (Bousbia, 2009).

En este método, la corteza del fruto es picada finamente y colocada en un recipiente al cual se le agrega suficiente agua. Esta mezcla se calienta hasta 90 °C y se pone en contacto con

una corriente de vapor procedente de un generador que arrastra la mezcla aceite-agua hasta un condensador. De esta forma se recolecta solo el aceite esencial mezclado con agua y se centrifuga para su separación por diferentes densidades. El método de destilación es el más usado en la producción comercial de aceites esenciales debido a los menores costos involucrados en el procesamiento (Buchel, 1989; Van de Braak y Leijten, 1999).

La destilación por arrastre con vapor es comúnmente utilizada para la extracción del aceite a escala industrial, pero también tiene un uso generalizado en los estudios a escala de laboratorio. El equipo consta de un simple diseño que hace que esta técnica sea disponible para la comunidad mundial. A pesar de su simplicidad, varios grupos de investigadores están trabajando para mejorar el diseño, especialmente para la rápida detección a pequeña escala del material vegetal. Aunque es un proceso muy eficiente, el calor aplicado, el agua, la acidez/basicidad, o trazas de metales en la muestra o equipo pueden causar saponificaciones, isomerizaciones, u otras reacciones no deseadas que pueden influir en la calidad del aceite esencial (Nakatsu *et al.*, 2000).

En general la destilación con arrastre de vapor consiste en que el vapor generado atraviesa la planta y extrae las microgotas del aceite esencial. Esta mezcla de aceite-agua se enfría en un serpentín mediante un circuito de agua fría. A la salida del serpentín, se obtiene una mezcla de agua y aceite esencial. El aceite esencial, de menor densidad que el agua, flota, lo que permite recuperarlo por la diferencia de densidad por lo que el aceite esencial se separa del agua de destilación.

1.5.3. Recuperación de agua en el proceso de recuperación de aceite

La fuente inicial de suministro de agua en una planta de recuperación de aceite esencial representa un factor crítico respecto a la calidad del aceite acabado y el buen funcionamiento de los equipos de recuperación de aceites. El agua debería ser pura y sin contaminantes químicos como sosa cáustica, amoníaco y cloro. Estas sustancias químicas pueden influenciar el sabor y la calidad total de aceite acabado. El agua debería tener un bajo contenido de minerales para limitar la formación de calcáreo en el interior de las centrifuga. Debería además ser filtrada hasta el estándar de claridad óptico (25 micrones o inferior) para eliminar toda la arena y las demás partículas que pueden dañar la superficie de las centrifugadoras (JBT foot tech, 2008).

El agua de condensado del producto enfriado es la que más se acerca a la satisfacción de todos los requisitos necesarios para la producción de aceites de cítricos. Es necesario el

máximo cuidado para garantizar que la misma no haya sido contaminada por soluciones cáusticas y que no tenga olores o sabores desagradables. El agua debería tener una carga microbiológica lo más baja posible (igual a los estándares para el agua potable), la limpieza de las frutas representa probable mente una cuestión esencial en lo que concierne a la contaminación bacteriana del proceso de recuperación del aceite. No se debería usar el agua procedente del evaporador de una línea de recuperación de desechos sin un tratamiento suplementario mirado a aumentar la limpieza (JBT foot tech, 2008).

En resumen, el agua con que se debe lavar los equipos del proceso de recuperación de aceites debe ser un agua pura que no contenga contaminantes químicos como la sosa cáustica, amoniaco y cloro; por lo que se recomienda usar un agua de condensado ya que esta sí posee los parámetros necesarios para que no se afecte la calidad final del producto en este caso los aceites esenciales.

1.6. Intercambiadores de calor

Según Jaramillo (2008) e Incropera y DeWitt, (2011) un intercambiador de calor es un sistema mecánico construido para transferir calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas, que están separados por una pared que puede ser metálica. Muchos autores coinciden en afirmar que esta transferencia de calor ocurre fundamentalmente a causa de los mecanismos de conducción y convección

Los intercambiadores se clasifican de acuerdo a la disposición del flujo relativo entre los dos fluidos y por sus características constructivas. Los más simples son aquellos en los que los fluidos se mueven en la misma dirección (flujo paralelo) o en la contraria (flujo a contracorriente) (Pérez, 2011).

1.6.1. Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar (Jones, 2003) según:

1. Arreglo del flujo

- Flujo paralelo: los dos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en el mismo sentido. La temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente.
- Contraflujo: los flujos entran por los extremos opuestos y fluyen en sentidos opuestos. La temperatura de salida del fluido frío puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente. El caso límite se tiene cuando la temperatura de salida del fluido frío es igual a la

temperatura de entrada del fluido caliente. La temperatura de salida del fluido frío nunca puede ser superior a la temperatura de entrada del fluido caliente.

- Flujo cruzado: se utilizan generalmente en el intercambio líquido-gas.

2. Tipo de construcción

- Tubo y coraza: están compuestos por tubos cilíndricos, montados dentro de una carcasa también cilíndrica, con el eje de los tubos paralelos al eje de la carcasa. Un fluido circula por dentro de los tubos, y el otro por el exterior (fluido del lado de la carcasa). Son el tipo de intercambiadores de calor más usado en la industria. Los componentes básicos de este intercambiador son: el haz de tubos (o banco de tubos), coraza, cabezal fijo, cabezal removible (o trasero), deflectores, y la placa tubular. Se usa una amplia variedad de configuraciones en los intercambiadores de calor de coraza y tubos, según el desempeño deseado de transferencia de calor, caída de presión y los métodos empleados para reducir los esfuerzos térmicos, prevenir fugas, fácil mantenimiento, soportar las presiones y temperaturas de operación, y la corrosión. Estos intercambiadores se construyen de acuerdo a las normas de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor Tubulares (TEMA), con algunas modificaciones, en dependencia del país. Estos deben ser de dimensiones apropiadas, para no dificultar así su mantenimiento, el cual incrementa los costos de la planta (Jaramillo, 2008).

- Doble tubo o tubos concéntricos: consta de dos tuberías concéntricas, una en el interior de la otra, de forma que circulen los dos fluidos por el espacio anular y por la tubería interior. Los flujos pueden ser en el mismo sentido (corrientes paralelas) o en sentido contrario (contracorriente). Se utilizaron por muchos años, sobre todo para índices de flujos bajos y gamas de temperaturas elevadas. Esas secciones de tuberías dobles están bien adaptadas para aplicaciones a altas temperaturas y presiones elevadas, debido a sus diámetros relativamente pequeños que permiten el empleo de bridas pequeñas y secciones delgadas de paredes, en comparación con los equipos ordinarios de casco y tubo (Torres *et al.* 2004).

- Intercambiadores de calor a placas: la industria alimenticia presenta varios casos donde se requiere operar con saltos térmicos reducidos, a bajas temperaturas y con tiempos mínimos de contacto, por lo que se requiere equipos especiales de transferencia de calor. Estos equipos especiales capaces de cumplir con los requisitos antes mencionados son los llamados intercambiadores de calor de placas. Estos son equipos muy difundidos en la Industria de procesos y cubren una amplia gama de aplicaciones, por lo que utilizados con

frecuencia como pasteurizadores. Presentan características muy especiales tanto en su diseño como en la operación que los hace motivo de un estudio particular. Comparado con otro tipo de intercambiadores, los de placas tienen una alta relación de transferencia de calor respecto al tamaño. El coeficiente de transferencia de calor es considerablemente mayor que el alcanzado por un intercambiador tradicional de carcasa y tubos. Los intercambiadores de calor de placas son ideales para aplicaciones en las que los fluidos tienen una viscosidad relativamente baja y no contienen partículas. Además, son una elección ideal donde existe un pequeño salto térmico entre la temperatura de salida del producto y la temperatura de entrada del servicio. Estos intercambiadores consisten en delgadas planchas corrugadas, empaquetadas o bien soldadas con cobre. Las placas son apretadas unas contra otras de modo que formen el paquete de placas dentro de un bastidor, en el que el flujo de producto se encuentra en canales alternos y el servicio entre los canales del producto (Gemina, 2015).

1.6.2. Diseño y evaluación de intercambiadores de calor

1.6.2.1. Diseño de intercambiadores de calor

Según Hernández y Lesino (2010), el diseño térmico de intercambiadores de calor se dirige a calcular el área de la superficie adecuada de transferencia de calor para un servicio dado, y se considera que el análisis hidráulico determina la caída de presión de los fluidos que fluyen en el sistema y, por consiguiente, la potencia de bombeo o el trabajo necesario para mantener el flujo. Los problemas más comunes de cálculo en intercambiadores de calor son la evaluación y el diseño o dimensionado.

El problema de la evaluación se determina según el funcionamiento termohidráulico de un intercambiador del que se conocen todas las especificaciones. Esto quiere decir que la evaluación determina el flujo de calor transferido, las temperaturas de salida y la caída de presión de las corrientes para un intercambiador de calor existente con un flujo establecido, con las temperaturas de entrada y, por consiguiente, el área de transferencia de calor y las dimensiones del equipo disponibles.

El dimensionado, sin embargo, se ocupa de la determinación del tamaño del intercambiador de calor. Aquí, se determinan el área y demás especificaciones de un intercambiador de calor apropiado para lograr el intercambio entre las corrientes caliente y fría, según los requerimientos de temperatura, el flujo de calor y las caídas de presión (Díaz, 2014).

El cálculo de intercambiadores de calor se basa en la definición del coeficiente global de transferencia de calor (U), que representa la velocidad de la transferencia de calor entre los fluidos. Este depende de los coeficientes peliculares de transferencia de calor (h_{i0}) en las dos caras de la superficie que separa los fluidos, de las propiedades físicas de los fluidos y de cómo estas dependen de la temperatura, además de la geometría de la pared y de sus propiedades físicas (Shilling, 2000; Incropera y DeWitt, 2011). Tiene en cuenta las resistencias individuales y globales a la transferencia, incluida la de la pared (R_w) (Branan, 2002). La resistencia de la pared depende de la conductividad térmica del material, y los coeficientes individuales de las propiedades físicas de los fluidos (Díaz, 2014).

No se puede dejar de mencionar que, en un intercambiador de calor, además de la transferencia de calor entre los dos fluidos, existe transferencia de calor con el medio circundante, a la cual se le denomina pérdidas de calor. Aunque en general este flujo de calor hay que tenerlo en cuenta, la práctica habitual es minimizarlo por recubrimiento de la superficie exterior con aislamiento térmico. Para el cálculo del flujo de calor entre ambos fluidos, y el área de intercambio que los separa, no se suelen incluir estas pérdidas (Rizo, 2008).

1.6.2.2. Evaluación de intercambiadores de calor

Para predecir el rendimiento de un intercambiador de calor, es esencial relacionar la transferencia total de calor con las temperaturas de entrada y salida del fluido, el coeficiente global de transferencia de calor y el área superficial total para la transferencia (Incropera y DeWitt, 2011).

Los métodos más usados en la evaluación de intercambiadores de calor son:

- Método del Factor de Corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (F_T – LMTD)
- Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia (ϵ – NTU)
- Método ψ –P

1- *Método del Factor de Corrección de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (F_T –LMTD):*

Para determinar el flujo de calor transferido es necesario conocer la diferencia de temperaturas entre los dos fluidos. Como el proceso consiste en transferir calor de un fluido caliente a uno frío, es evidente que la diferencia de temperaturas a la entrada en el

intercambiador de calor será máxima y que esta se reducirá según los fluidos circulan por el intercambiador, por lo que a la salida se encontrará la menor diferencia de temperatura. Por lo tanto, dicha diferencia es variable. Además, depende de la disposición de los tubos, del número de pasos y de la geometría del equipo (Incropera y DeWitt, 2011; Towler y Sinnott, 2008).

Por otra parte, McCabe *et al.* (1998) e Incropera y DeWitt (2011) coinciden al afirmar que la diferencia de temperatura es mayor cuando las corrientes de proceso están en contracorriente, y se aumenta la velocidad de transferencia de calor.

Este método puede ser aplicado si se consideran constantes a lo largo de toda la superficie el coeficiente de transferencia de calor y el calor específico para cada uno de los agentes portadores de calor. En el caso de que estos valores cambien considerablemente a lo largo de la superficie de intercambio de calor, resulta inexacta la aplicación del diferencial logarítmico de temperatura, y para ello la ecuación principal de transferencia de calor se resuelve al emplear el método de integración gráfica (Towler y Sinnott, 2008).

2- Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia ($\epsilon - NTU$):

Este método fue desarrollado por primera vez en detalle por Kays M. y London A. en 1955, y se basa en determinar la cantidad de calor transferido respecto a la máxima cantidad de calor posible a transferir durante el proceso dado (Imbert y Guillen, 2011).

Se basa además en el concepto de la efectividad del intercambiador de calor, el cual es un parámetro adimensional, definido como la razón de la transferencia de calor real entre la máxima transferencia de calor que puede ser posible si se tratara de un intercambiador de contraflujo.

Es un procedimiento ideal para evaluar el funcionamiento de un intercambiador de calor ya existente, puesto que se emplea cuando el área de transferencia de calor y los detalles de la construcción son conocidos. Consiste en determinar el intercambio de calor por cada grado de diferencia de temperatura (Izquierdo, 2001; Tower y Sinnott, 2008).

3- Método $\psi - P$:

Según Towler y Sinnott, 2008 el método $\psi - P$ combina las variables de los métodos $F_T - LMTD$ y $\epsilon - NTU$. El término ψ se introduce como la relación de la diferencia verdadera de temperaturas y la diferencia de temperaturas en el cabezal frío (la diferencia entre las temperaturas a la entrada de los dos fluidos, $T_1 - t_1$).

1.6.3. Análisis de apreciación de un Intercambiador de calor existente

Cuando todas las ecuaciones pertinentes se usan para calcular la adaptabilidad de un intercambiador existente para ciertas condiciones del proceso, esta investigación se llama apreciación de un intercambiador.

Hay tres puntos de significación en la apreciación de la adaptabilidad de un intercambiador existente para un nuevo uso (Kern, 1999).

1. ¿Qué coeficiente limpio de transferencia de calor (U_c) puede lograrse como resultado del flujo de ambos fluidos y sus coeficientes de película individuales h_{i0} y h_{o0} ?
2. Del balance de calor, del área de transferencia conocida (A), y de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD) para las temperaturas del proceso, se obtiene un valor de diseño o coeficiente de diseño (U_D). U_c debe exceder a U_D suficientemente, de manera que el factor de obstrucción (R_d), que es una medida del exceso de superficie, permita la operación del intercambiador por un periodo de servicio razonable.
3. La caída de presión para las dos corrientes no debe exceder la permitida.

Cuando estas condiciones han sido alcanzadas, el intercambiador en existencia es apropiado para las condiciones de proceso para las que ha sido evaluado. Al iniciar los cálculos el primer punto es determinar si el fluido caliente o frío deberá pasar por la coraza. No existe una regla rápida para esto. Una corriente puede ser grande y la otra pequeña, el espaciado de los deflectores puede ser tal que en cierta vez el área de flujo del lado de la coraza sea grande. Cualquier selección puede corroborarse intercambiando las dos corrientes y viendo qué arreglos da los mayores valores de U_c sin exceder la caída de presión permitida (Kern, 1999).

1.6.4. Ensuciamiento u obstrucción de intercambiadores de calor

Cuando los aparatos de transferencia de calor están en servicio por algún tiempo, aumenta la resistencia a la transferencia, lo que produce que la cantidad requerida de calor no se transfiere por la superficie original. Las resistencias a la transferencia de calor debidas al ensuciamiento son causadas por sedimentos, polímeros y otros depósitos que se forman en las paredes internas y externas de los tubos de los intercambiadores de calor, cuando éstos se encuentran en servicio. Los valores que se utilizan en el diseño toman en cuenta las resistencias que se esperan durante la operación normal del equipo y un tiempo de servicio

razonable entre los períodos de limpieza o mantenimiento (Kern, 1999; Incropera y DeWitt, 1999).

El adecuado mantenimiento de los equipos industriales, a intervalos predeterminados, puede evitar fallos operativos que provoquen paradas de la planta e impide que se reduzcan la posibilidad de que disminuya el nivel de aceptabilidad del equipo por debajo de lo establecido, con sus respectivos inconvenientes económicos y ambientales (Oliva, 1988; Rodríguez, 2005).

Para obviar esta eventualidad, es costumbre diseñar el equipo anticipando la deposición de basura e incrustaciones, introduciendo una resistencia R_d llamada factor de basura, incrustación o de obstrucción. El factor de obstrucción para el fluido del tubo interior a su diámetro interior y el factor de obstrucción para el fluido del ánulo en el diámetro exterior del tubo interior, pueden ser considerados muy delgados para lodos, pero apreciablemente gruesos para incrustaciones, que tienen conductividad térmica mayor que los lodos.

1.7. Conclusiones parciales

1. A través de la PML se facilita el trabajo de minimización de la contaminación del medio ambiente, aumenta la calidad en los productos terminados, tiene por objetivo reducir los impactos durante el ciclo de vida del producto bajo las condiciones económicas actuales y mejora la eficiencia de las empresas.
2. En la realización de este proyecto se utilizará la metodología de Producción Más Limpia propuesta por PNUMA que consta de 5 etapas: planeación y organización, evaluación previa, evaluación, estudio de factibilidad e implantación.
3. Las principales dificultades para la implantación de la estrategia de PML en la empresa es la falta de recursos financieros, así como carencia de una tecnología apropiada.
4. Para la evaluación del intercambiador de calor, el método a utilizar es el Método de la Eficiencia y el Número de Unidades de Transferencia ($\epsilon - NTU$), teniendo en cuenta su metodología, siendo esta la ideal para el desarrollo de esta temática.
5. Para evaluar el adecuado funcionamiento de los intercambiadores de calor es necesario determinar los factores de obstrucción en el tiempo de servicio o de explotación, además de desarrollar un análisis de apreciación que permita determinar si es apropiado para las condiciones del proceso.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se aplica en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón” la metodología de PML propuesta por el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2006), referida en el epígrafe 1.4; con el objetivo de proponer la opción de mejora tecnológica que permita la minimización de los residuales líquidos y el aprovechamiento energético en esta industria.

2.1 Planeación y organización

2.1.1 Compromiso y organigrama de la UEB

La UEB tiene definido su compromiso social y ambiental, y su política ambiental (Anexo 1a) en el documento que describe el proceso productivo (Departamento de tecnología, 2015), donde se define además la misión, visión y los objetivos de la Empresa. En el compromiso ambiental de la dirección de la UEB participan los Consejos Técnico Asesor, Energético y de Producción. La estructura organizacional de la Empresa se refleja en el Anexo 1b.

2.2 Evaluación previa

2.2.1 Caracterización de la UEB y descripción del proceso tecnológico

Se define la ubicación físico-geográfica de la UEB, así como la descripción del proceso productivo. Se caracteriza la Empresa, se detallan las etapas del proceso y las variables de control operacional en cada una de ellas.

2.2.2 Diagnóstico ambiental

El diagnóstico ambiental de la UEB fue realizado por el grupo de gestión ambiental, Para ello se seleccionaron los especialistas según la metodología del sistema de gestión ambiental, el tecnólogo principal es el responsable del equipo, en el que se refieren los aspectos asociados a la actividad principal, así como el carácter y la valoración de su impacto ambiental.

La Gestión Ambiental está enfocada principalmente a los procesos productivos, pero con enfoque de sistemas que incluye su desempeño en cuanto a resultados en la producción, índices de consumos, rendimientos, indicadores económicos y atención al hombre; con el objetivo de reducir o mitigar los impactos negativos que generan las actividades que se

llevan a cabo en la UEB y así proteger el medio ambiente y preservar los recursos naturales (Diagnóstico Ambiental UEB, 2015).

Como estrategia preventiva la PML se lleva a cabo en cada una de las tareas del plan anual ambiental. Existe en la UEB un banco de problemas identificados que ha permitido presentar un grupo de proyectos de PML, algunos ya en explotación, otros en proceso y otros planificados para el futuro. Estos garantizan el uso eficiente de materias primas, insumos, agua y energía, la minimización y tratamiento de residuales dispuestos al final del proceso (Diagnóstico Ambiental UEB, 2015). Todo lo anterior permite seleccionar el problema técnico que se identifica en la etapa de destilación, para darle solución con la opción propuesta.

2.3 Evaluación y estudio de factibilidad

2.3.1 Identificación y propuesta de la opción de producción más limpia

La opción de PML radica en la propuesta de un sistema de flujo para el aprovechamiento de la corriente de condensado que se genera en el proceso de destilación, la cual será utilizada para el pre-calentamiento de los lodos y la limpieza de otros equipos.

2.3.2. Evaluación de la factibilidad técnica de la propuesta

Para implementar la propuesta la UEB solo cuenta con un Intercambiador de calor de tubo y coraza (Calentador Tubular. N/Ref. DT.- 257/JMA/10.301 A.P.V IBERICA, S.A, 1980), por lo que es necesario la adquisición del resto de los insumos del sistema. De ahí que se diseñe el sistema de flujo, se seleccione la bomba adecuada que satisfaga los requerimientos del sistema, se evalúe el intercambiador disponible y se defina su tiempo de limpieza.

2.3.2.1. Diseño del sistema de flujo

Cálculo de la carga de la bomba.

Para el cálculo de la carga de la bomba se utiliza la ecuación de balance de energía mecánica de Bernoulli, según la metodología que se presenta a continuación (Rosabal, 2006).

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + Hb_s = \frac{P_2}{\rho_2 g} + Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \sum Hf \quad (2.1)$$

Donde:

P_1 : presión en el punto de referencia 1, Pa

P_2 : presión en el punto de referencia 2, Pa

ρ_1 : densidad del fluido en el punto de referencia 1, kg/m^3

ρ_2 : densidad del fluido en el punto de referencia 2, kg/m^3

Z_1 : altura en el punto de referencia 1, m

Z_2 : altura en el punto de referencia 2, m

α : factor de corrección de energía cinética ($\alpha = 1$ para régimen de flujo turbulento,

$\alpha = 0,5$ para régimen de flujo laminar)

α_1 : factor de corrección de energía cinética en el punto de referencia 1

α_2 : factor de corrección de energía cinética en el punto de referencia 2

v_1 : velocidad del fluido en el punto de referencia 1, m/s

v_2 : velocidad de fluido en el punto de referencia 2, m/s

g : valor de la aceleración de la gravedad, m/s^2

H_{b_s} : carga del sistema, m

ΣH_f : pérdidas por fricción totales, m

A partir de aplicar el balance de energía mecánica (ec 2.1) al sistema de flujo se obtiene la carga de la bomba necesaria para el sistema (H_{b_s}).

Cálculo de las pérdidas por fricción totales (ΣH_f)

Para el cálculo de las pérdidas por fricción totales se considera las pérdidas en tuberías, accesorios e intercambiador de calor. Se tiene en cuenta los tramos de tuberías antes (AI) y después (DI) del intercambiador por la diferencia de temperatura en ambos tramos, lo cual repercute en las propiedades físicas del fluido. En el diseño se considera el mismo diámetro de tubería en todo el sistema.

Las pérdidas por fricción totales se determinan por la siguiente expresión:

$$\Sigma H_f = (Hf_t + Hf_{acc})_{AI} + (Hf_t + Hf_{acc})_{DI} + Hf_{IC} \quad (2.2)$$

Donde:

ΣH_f : Pérdidas por fricción totales de la instalación, m

$H_{f_{IC}}$: Pérdidas por fricción en el Intercambiador de calor, m

H_{f_t} : Pérdidas por fricción en las tuberías, m

$H_{f_{acc}}$: Pérdidas por fricción en accesorios, m

Tramo 1: tramo antes del intercambiador de calor (AI)

Tramo 2: tramo después del intercambiador de calor (DI)

✓ Tuberías:

$$H_{f_t} = \frac{fv^2L}{d2g} \quad (2.3)$$

Donde:

H_{f_t} : pérdidas por fricción total en tuberías, m

f: factor de fricción

v: velocidad del fluido en la tubería, m/s

L: longitud de la tubería, m

d: diámetro de la tubería, m

1. Cálculo del área de la tubería (A_t , m²):

$$A_t = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.4)$$

2. Cálculo de la velocidad del fluido en la tubería (v, m/s)

$$v = \frac{q_s}{A_t} \quad (2.5)$$

Donde q_s es el flujo volumétrico (m³/h) del condensado (Departamento de tecnología, 2015)

3. Cálculo del número adimensional de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (2.6)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido en tuberías a la temperatura del fluido, kg/m^3

μ : viscosidad del fluido en tuberías a la temperatura del fluido, Pa.s

R_e - régimen de flujo turbulento ($R_e > 4000$), régimen de flujo laminar ($R_e < 2100$)

4. Factor de fricción: Se determina en la figura 3.9 del Rosabal (2006; p89) a partir del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (ϵ).

$$\epsilon = \frac{e}{D} \quad (2.7)$$

Donde:

e : Rugosidad absoluta (mm). Este valor depende del tipo de tubería (Tabla 9 Rosabal, 2006; p281)

✓ Intercambiador de calor: El valor de las pérdidas por fricción en el intercambiador de calor siguiendo (Hf_{IC}) se encuentra en el manual del intercambiador de calor A.P.V - IBERICA, S.A, 1980.

✓ Accesorios

5. Cálculo de las pérdidas por fricción en accesorios (Hf_{acc} , m)

$$Hf_{acc} = \sum k \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.8)$$

Donde:

k : coeficientes de resistencias locales de cada accesorio (Rosabal, 2006)

Cálculo del NPSH del sistema

Para comprobar uno de los criterios de selección de la bomba se calcula el $NPSH_s$ por la siguiente ecuación:

$$NPSH_s = \frac{P_s - P_v}{\rho g} \quad (2.9)$$

Donde:

$NPSH_s$: carga neta de succión positiva del sistema.

P_s : presión de succión de la bomba, Pa

P_v : presión de vapor de agua a la temperatura del fluido, Pa (tabla 16 del Rosabal, 2006, p290)

Para calcular P_s se realiza un balance de energía mecánica antes de la bomba (AB) según la metodología anteriormente descrita.

Evaluación del sistema de Bombeo

Para evaluar el adecuado funcionamiento de la bomba se tienen en cuenta los cuatro criterios imprescindibles para validar el funcionamiento de los sistemas de flujo:

- $H_b > H_{bs}$
- $q_b > q_s$
- $NPSH_s > 0$
- $NPSH_b \leq NPSH_s$

Donde:

H_b : Carga de diseño de la bomba para el flujo de operación. Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (Catálogo)

q_b : Flujo máximo de diseño de la bomba. Se determina a partir de los datos brindados por el fabricante (Catálogo)

$NPSH_b$: Carga neta de succión positiva de la bomba: Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (Catálogo)

Consumo de potencia (N)

$$N = \frac{H_b \cdot q_s \cdot \rho_1 \cdot g}{\eta} \quad (2.10)$$

Donde:

η : Eficiencia de la bomba (%). Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba

2.3.2.2. Metodología para la evaluación del intercambiador de calor

Criterio de Evaluación del Intercambiador de calor:

- Al calcular el área efectiva del intercambiador se compara con el área del intercambiador de calor existente para evaluar si este satisface los requerimientos técnicos del sistema.
- Criterios para la adaptabilidad del intercambiador de calor

Cálculo del área del intercambiador:

Para la evaluación de los intercambiadores de calor se utiliza el método de la efectividad y el número de unidades de transmisión (ϵ - NTU) ya que, aunque existen varias metodologías, esta es la más sencilla de aplicar y es una de las más utilizadas (Incroperay DeWitt, 1999). Este es un procedimiento ideal para evaluar el funcionamiento de un Intercambiador de calor ya existente, puesto que se emplea cuando el área de transferencia de calor y los detalles de la construcción son conocidos (Izquierdo, 2001; Tower y Sinnott, 2008).

El empleo de ecuaciones empíricas hace necesario el uso de unidades del Sistema Inglés.

- **Condiciones de proceso requeridas**

Las condiciones de proceso que se requieren son:

Para el fluido caliente: $T_1, T_2, W, C, s, \mu, k, R_d, \Delta P$

Para el fluido frío: $t_1, t_2, w, c, s, \mu, k, R_d, \Delta P$

Donde:

T_1, T_2 : Temperaturas de entrada y salida del fluido caliente, ($^{\circ}\text{F}$)

t_1, t_2 : Temperaturas de entrada y salida del fluido frío, ($^{\circ}\text{F}$)

W : Flujo másico del fluido caliente, (lb/h)

w : Flujo másico del fluido frío, (lb/h)

C : Calor específico del fluido caliente, (Btu/lb. $^{\circ}\text{F}$)

c : Calor específico del fluido frío, (Btu/lb. $^{\circ}\text{F}$)

s: Gravedad específica

μ : Viscosidad del fluido, (lb/pie.h)

k: Conductividad térmica, (Btu/h.pie²(°F/pie))

Rd: Factor de obstrucción, (h.pie².°F/Btu)

ΔP : Caída de presión, (lb/plg²)

- **Datos de diseño del intercambiador de calor existente**

Los datos de diseño del intercambiador de calor que se requieren son:

Para el lado de la coraza: Diámetro interior, Espaciado de los deflectores, Pasos

Para el lado de los tubos: Número y longitud, Diámetro exterior, Arreglo, Pasos.

Para este tipo de intercambiador de tubo y coraza el número de unidades de transmisión (NTU) se calcula por:

$$NTU = -(1 + Cr^2)^{-\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{E-1}{E+1} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

C_r : Relación de capacidad calórica

$$E = \frac{\frac{2}{\xi} - (1 + Cr)}{(1 + Cr^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.12)$$

Cálculo de la eficiencia del intercambiador (ξ , %):

$$\xi = \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} \times 100 = \frac{W.Cp_{cond}(T_1 - T_2)}{C_{min}(T_1 - t_1)} \times 100 \quad (2.13)$$

$$Q_{m\acute{a}x} = C_{min}(T_1 - t_1) \quad (2.14)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x}$: Máxima cantidad de calor transferido, (kcal/h)

Q : Calor intercambiado, (kcal/h)

Q_{ced} : Calor cedido por fluido caliente, (kcal/h)

Q_{abs} : Calor adsorbido por el fluido frío, (kcal/h)

C_{min} : Es el resultado del valor menor entre la C_c y C_h

Según Kern (1999), las pérdidas por radiación de los intercambiadores usualmente son insignificantes comparadas con la carga térmica transferida en el equipo. Considerando despreciables las pérdidas de calor en el intercambiador: $Q_{ced} = Q_{abs}$

$$Q_{ced} = C_h(T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

$$Q_{abs} = C_c(t_2 - t_1) \quad (2.16)$$

$$C_c = w \cdot cp_{lodo} \quad (2.17)$$

$$C_h = W \cdot Cp_{cond} \quad (2.18)$$

Donde:

C_c : Capacidad térmica de la corriente fría ($kcal/h^\circ C$)

C_h : Capacidad térmica de la corriente caliente ($kcal/h^\circ C$)

Cp_{cond} : Capacidad calórica del fluido caliente a presión constante- 1atm ($kcal/kg^\circ C$)

cp_{lodo} : Capacidad calórica del fluido frío a presión constante- 1atm ($kcal/kg^\circ C$)

✓ Cálculo de la relación de capacidad calorífica (C_r)

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{máx}} \quad (2.19)$$

C_{max} : Es el resultado del valor mayor entre la C_c y C_h

✓ Cálculo del área efectiva del Intercambiador de calor (A , m^2)

El área efectiva del Intercambiador de calor se calcula a partir de la siguiente expresión (tabla 11.4; Incropera y DeWitt, 1999):

$$NTU = \frac{U_D A}{C_{min}} \quad (2.20)$$

Donde:

A : área efectiva del Intercambiador de calor (m^2)

NTU : Número de unidades de transmisión

U_D : Coeficiente global de transferencia de calor ($kcal/hm^2^\circ C$) (tabla 11.2; Incropera y DeWitt, 1999)

Adaptabilidad de un intercambiador de calor existente

Para evaluar la adaptabilidad de intercambiadores de calor existentes para su nuevo uso es necesario comprobar las siguientes condiciones de significación (Kern, 1999):

- El coeficiente total limpio de transferencia de calor (U_C) debe exceder al coeficiente total de diseño (U_D), de manera que el factor de obstrucción, que es una medida del exceso de superficie, permita la correcta operación del calentador por un periodo de servicio razonable.
- El factor de obstrucción (Rd_{cal}) calculado debe ser mayor que el factor de obstrucción (Rd_{req}) requerido.
- La caída de presión calculada no debe exceder la caída de presión permitida para las dos corrientes.

A continuación se describe la metodología de cálculo para evaluar estas condiciones

- **Determinación de la diferencia verdadera de temperatura**

La diferencia verdadera de temperatura entre las dos corrientes puede ser calculada a partir de ecuación siguiente:

$$\Delta t = LMTD.F_T \quad (2.21)$$

Donde:

Δt : Diferencia verdadera de temperatura entre las dos corrientes, (°F).

LMTD: Media logarítmica de la diferencia de temperatura, (°F).

F_T : Factor de diferencia de temperatura, (adimensional).

De acuerdo a lo planteado por Kern, (1999), para flujos a contracorriente F_T es aproximadamente igual a la unidad, de ahí que:

$$\Delta t = LMTD \quad (2.22)$$

La media logarítmica de la diferencia de temperatura puede ser calculada como:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (2.23)$$

- **Cálculos para el lado de los tubos**

Fluido frío: lodo o aceite destilado

Si bien Kern (1999) propone que el condensado del vapor debe fluir por los tubos y no por la coraza, debido a su poder corrosivo y el daño que puede ocasionar en ambas partes, en esta investigación se decide proponer que el lodo o aceite destilado fluya por los tubos ya que es el producto principal del proceso y el más sucio de los dos fluidos. Esta disposición facilitará la recuperación del lodo en la etapa de limpieza y el mantenimiento del equipo.

Determinación del área de flujo:

El área de flujo para el lado de los tubos se determina mediante la expresión:

$$a_t = \frac{N_t \cdot a_t'}{144n} \quad (2.24)$$

Donde:

a_t : Área de flujo, (pie²)

a_t' : Área de flujo por el tubo, (plg²) (Tabla 10 de Kern, 1999).

N_t : Número de tubos

n : Número de pasos en los tubos

Cálculo de la velocidad másica:

La velocidad másica del lodo queda expresada como:

$$G_t = \frac{w}{a_t} \quad (2.25)$$

Donde:

G_t : Velocidad másica del lodo en los tubos, (lb/h.pie²)

w : Flujo másico del lodo, (lb/h)

Cálculo del número de Reynolds

Una vez determinado el diámetro interior de los tubos y la velocidad másica del lodo, el número de Reynolds para el lado de los tubos queda expresado de la siguiente forma:

$$\text{Re}_t = \frac{D \cdot G_t}{\mu} \quad (2.26)$$

Donde:

D : Diámetro interior del tubo, (pie) (tabla 10 Kern, 1999)

G_t : Velocidad másica del lodo en los tubos, (lb/hpie²)

μ : Viscosidad del lodo a t_c , (lb/pie.h) (fig. 14 Kern, 1999)

t_c : Temperatura promedio del lodo, (°F)

La viscosidad del lodo a t_c puede ser determinada mediante la Figura 14 de Kern (1999)

$$h_{io} = h_i \frac{D_i}{D_E} \Phi_t \quad (2.27)$$

Donde:

D_i : diámetro interior de los tubos (ft)

D_E : diámetro exterior de los tubos (ft)

Φ_t = relación de viscosidad en los tubos, $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$

μ : Viscosidad del lodo a t_c , (lb/pie.h) (fig. 14 Kern, 1999)

μ_w : Viscosidad del lodo a la temperatura t_w , (lb/pie.h) (fig. 14 Kern, 1999)

Determinación del coeficiente de transferencia de calor

La relación entre la razón de viscosidad y el coeficiente de transferencia de calor del fluido interior (h_i) queda expresada de la forma siguiente:

$$h_i = j_H \cdot \frac{k}{D_e} \cdot \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} \cdot \Phi_t \quad (2.28)$$

Donde:

h_i : Coeficiente de transferencia de calor del fluido interior, (Btu/h.pie².°F)

Φ_t : Razón de viscosidad en el lado de los tubos, (adimensional)

j_H : Factor de transferencia de calor, (adimensional) (fig 24 Kern, 1999)

D_e : Diámetro equivalente, (pie)

μ : Viscosidad del lodo a t_c (lb/pie.h) (fig. 14 Kern, 1999)

k : Conductividad térmica del lodo a t_c (Btu/h.pie²)(°F/pie)

c : Calor específico del lodo, (Btu/lb.°F)

- **Cálculos para el lado de la coraza**

Fluido caliente: condensado de vapor

Determinación del área de flujo

El área de flujo para el lado de la coraza se determina mediante la expresión:

$$a_s = \frac{DI.C'.B}{144.P_T} \quad (2.29)$$

Donde:

a_s : Área de flujo, (pie²)

DI : Diámetro interior de la coraza, (plg)

C' : Sección libre entre tubos, (plg)

B : Espaciado de los deflectores, (plg)

P_T : Espaciado entre tubos, (plg)

$$P_T = C' + d_o \quad (2.30)$$

Donde d_o : Diámetro exterior de los tubos, (plg)

Cálculo de la velocidad másica

Conociendo el flujo másico de condensado (W), el cual corresponde al valor de q_s en el sistema de flujos el área de flujo para el lado de la coraza (a_s), la velocidad másica del condensado (G_s) queda expresada según la ecuación 2.25:

$$G_s = \frac{W}{a_s} \quad (2.31)$$

Determinación del diámetro equivalente

El diámetro equivalente para el lado de la coraza puede determinarse en función del tipo de arreglo dispuesto en el cabezal de los tubos. Los diámetros equivalentes para los arreglos comunes se incluyen en la figura 28 de Kern (1999), y pueden ser determinados en dicha figura a partir del diámetro exterior de los tubos (d_o) y del espaciado entre tubos (P_T).

Cálculo del número de Reynolds

Una vez calculado el diámetro equivalente en pie (D_e) y la velocidad másica del condensado (G_s), el número de Reynolds para el lado de la coraza queda expresado según la ecuación 2.26.

$$Re_s = \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \quad (2.32)$$

Siendo μ la viscosidad del condensado a T_c , la cual puede determinarse en la figura 14 Kern, 1999.

T_c : Temperatura promedio del condensado, ($^{\circ}F$)

Determinación del factor de transferencia de calor

El factor de transferencia de calor (j_H) puede ser determinado a partir del número de Reynolds (Re_s) en la figura 28 de Kern (1999).

Determinación del coeficiente de transferencia de calor

La relación entre la razón de viscosidad y el coeficiente de transferencia de calor del fluido exterior (h_o) queda expresada de la forma siguiente:

$$h_o = j_H \cdot \frac{k}{D_e} \cdot \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} \cdot \phi_s \quad (2.33)$$

Donde:

h_o : Coeficiente de transferencia de calor del condensado, (Btu/h.pie². $^{\circ}F$)

μ : Viscosidad del condensado a T_c , (lb/pie.h) (fig. 14 Kern, 1999)

k : Conductividad térmica del condensado a T_c , (Btu/h.pie².($^{\circ}F$ /pie))

c : Calor específico del condensado, (Btu/lb. $^{\circ}F$)

ϕ_s : Razón de viscosidad en la coraza, (adimensional) $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$

μ : Viscosidad del condensado a T_c , (lb/pie.h)

μ_w : Viscosidad del condensado a la temperatura t_w , (lb/pie.h)

Las propiedades del condensado (μ , c , k) se obtienen en Incropera y de Witt (2011, tabla A6)

Determinación de la temperatura de la pared del tubo

Es importante porque permite verificar si el material del tubo es apropiado para el proceso y además, se requiere para el diseño térmico cuando las propiedades de transporte de los fluidos varían a lo largo del intercambiador.

La temperatura de la pared del tubo puede ser calculada como:

$$t_w = t_c + \frac{h_{i_o}}{h_{i_o} + h_o} (T_c - t_c) \quad (2.34)$$

Donde:

t_w : Temperatura de la pared del tubo, (°F)

h_{i_o} : Coeficiente de transferencia de calor del lodo referido al diámetro exterior del tubo, (Btu/h.pie².°F)

Se evalúa la viscosidad a la temperatura de la pared (t_w) y se corrige el valor de los coeficientes individuales de transferencia de calor

- **Determinación del coeficiente total limpio de transferencia de calor**

El coeficiente total limpio de transferencia de calor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$U_C = \frac{h_{i_o} \cdot h_o}{h_{i_o} + h_o} \quad (2.35)$$

Donde:

U_C : Coeficiente total limpio de transferencia de calor, (Btu/h.pie².°F)

- **Determinación del coeficiente total de diseño de transferencia de calor**

El coeficiente total de diseño de transferencia de calor se determina mediante la expresión:

$$U_D = \frac{Q}{A.LMTD} \quad (2.36)$$

Donde:

U_D : Coeficiente total de diseño de transferencia de calor, (Btu/h.pie².°F)

Q : Calor absorbido por el lodo o cedido por el condensado, (Btu/h)

A : Área de transferencia de calor, (pie²)

El área de transferencia de calor está dada por:

$$A = a'' . L . N_t \quad (2.37)$$

Donde:

L : Longitud de los tubos, (pie)

a'' : Superficie externa por pie lineal, (pie)

La superficie externa por pie lineal puede ser determinada en la Tabla 10 de Kern (1999).

- **Determinación del factor de obstrucción**

La expresión para el cálculo del factor de obstrucción es la que sigue:

$$R_d = \frac{U_c - U_D}{U_c . U_D} \quad (2.38)$$

Donde:

R_d : Factor de obstrucción, (h.pie².°F/Btu)

El factor de obstrucción requerido ($R_{d_{req}}$) puede ser determinado en la Tabla 12 de Kern (1999).

Si el factor de obstrucción calculado iguala o excede al factor de obstrucción requerido ($R_{d_{calc}} > R_{d_{req}}$), el intercambiador seleccionado es apropiado. De cumplirse esta condición se continua con el cálculo de la caída de presión. Después de ciertos períodos operacionales

debe definirse el tiempo perfecto para realizar su limpieza mecánica, ya que a partir de entonces no transfiere una cantidad de calor requerida por el proceso.

- **Determinación de la caída de presión para el lado de los tubos**

La caída de presión para el lado de los tubos se determina como:

$$\Delta P_T = \Delta P_i + \Delta P_r \quad (2.39)$$

Donde:

ΔP_T : Caída de presión para el lado de los tubos, (lb/plg²)

ΔP_i : Caída de presión en los tubos, (lb/plg²)

ΔP_r : Caída de presión de retorno o pérdida de regreso, (lb/plg²)

La caída de presión en los tubos viene dada por la expresión:

$$\Delta P_t = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D \cdot s \cdot \phi_t} \quad (2.40)$$

Donde:

f : Factor de fricción para el lado de los tubos, (pie²/plg²) (Fig 26 Kern, 1999)

s : gravedad específica del lodo (adimensional)

ϕ_t : Razón de viscosidad en los tubos, (adimensional) $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$

De acuerdo a lo planteado por Kern (1999), al fluir de un paso al otro, pasando por el carrete y el cabezal flotante, el fluido cambia de dirección bruscamente. Este cambio de dirección introduce una caída de presión adicional llamada caída de presión de retorno o pérdida de regreso, y se consideran cuatro cabezas de velocidad por paso como pérdida.

La caída de presión de retorno viene dada por la ecuación:

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.41)$$

Donde:

V : Velocidad, (pie/s)

La cabeza velocidad $V^2/2g$ se encuentra graficada contra la velocidad másica en la figura 27 del Kern (1999).

Según Kern (1999) es costumbre permitir una caída de presión de 5 a 10 lb/plg² para un intercambiador o batería de intercambiadores que desempeñen un mismo servicio en un proceso.

- **Determinación de la caída de presión para el lado de la coraza**

La caída de presión a través de la coraza de un intercambiador, según lo planteado por Kern (1999), es proporcional al número de veces que el fluido cruza el haz entre los deflectores. También es proporcional a la distancia a través del haz, cada vez que lo cruza.

La ecuación isotérmica para la caída de presión en la coraza, para fluidos que se calientan o enfrían, y que incluye las pérdidas de entrada y salida es:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_e \cdot s \cdot \phi_s} \quad (2.42)$$

Donde:

f : Factor de fricción para el lado de la coraza, (pie²/plg²) (fig. 29 Kern, 1999)

$N+1$: Número de cruces

D_s : Diámetro interior de la coraza, (pie)

s : gravedad específica del condensado (adimensional)

El número de veces que el haz se cruza ($N+1$) se determina a partir de la expresión siguiente:

$$N+1 = 12 \frac{L}{B} \quad (2.43)$$

Donde

N : Número de deflectores.

Las correlaciones graficadas para obtener el factor de fricción f para el lado de la coraza, aparecen en la Figura 29 de Kern (1999).

2.3.3 Evaluación de la factibilidad económica de la propuesta

Se recomienda utilizar como indicadores económicos para definir la factibilidad económica del sistema de flujo propuesto el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) y el Plazo de Recuperación de la Inversión (PRI) (Peters, 1991).

La inversión inicial se determina a partir del costo de adquisición de los equipos y materiales necesarios para poner en práctica la opción de PML propuesta:

- El costo de producción está referido a la disminución por concepto de la nueva modificación del proceso. El costo de producción (CP) depende de los elementos de costos, el cual incluye como costos fijos (CF): mantenimiento, amortización gastos de servicio; y como costos variables (CV): materia prima, insumos principales, materiales auxiliares, combustibles, transportación, energía eléctrica, salario y seguridad social:

$$CP = CF + CV \quad (2.44)$$

- El valor de la producción (VP) se calcula como el precio unitario de cada producto por el volumen de producción.

$$VP = \text{pup} * V_p \quad (2.45)$$

Donde:

pup (\$/t): precio unitario del producto (Destilado)

V_p: Volumen de producción, referido al incremento por concepto de la nueva modificación del proceso

Todos los costos analizados, así como el precio unitario del producto aparecen reflejados en la ficha de costo del Departamento de Economía de la UEB.

Una vez determinado el costo de producción total y el valor de la producción, se calcula el movimiento de fondos o flujo de caja, que es la diferencia entre los cobros y pagos que se producen como resultado de la inversión. Este movimiento de fondos se hace para cada año del horizonte.

$$\text{Movimiento de fondos} = \text{Cobros} - \text{Pagos} \quad (2.46)$$

El VAN, se determina como la suma del movimiento de fondo actualizado, para un interés dado (i) en el tiempo que enmarca el horizonte (n) y su valor debe ser positivo y en el orden

de la inversión. Según este criterio, son aceptadas aquellas inversiones que tengan un VAN positivo, siendo más interesante cuanto mayor sea.

$$VAN = S_0 + \frac{S_1}{(1+i)^1} + \frac{S_2}{(1+i)^2} \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n} \quad (2.47)$$

Donde:

VAN: Valor actual neto (\$)

S: Movimiento de fondos (\$)

i: Interés (%)

El TIR, se determina calculando el VAN para diferentes tasas de interés, donde si el TIR $> i$, conviene la realización del proyecto. Se define como aquella tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos netos de efectivo esperados de un proyecto con el desembolso inicial. Se acostumbra a definir la TIR, como aquella tasa de descuento que iguala a cero el VAN.

$$TIR = i_1 - \frac{VAN(P)(i_1 - i_2)}{VAN(P) - VAN(N)} \quad (2.48)$$

Donde:

TIR: Tasa interna de retorno (%)

VAN (P): Valor actual neto positivo (\$)

VAN (N): Valor actual neto negativo (\$)

i_2 : Interés para el cual el VAN se hace negativo (\$)

El PRI, es aquel en donde el movimiento de fondo se hace positivo, lo que quiere decir que ya se pagó la inversión realizada.

$$PRI = \frac{I}{G} \quad (2.49)$$

$$G = VP - CP \quad (2.50)$$

PRI: Plazo de Recuperación de la Inversión (año)

I: Inversión

G: Ganancia

Se decide además calcular el retorno de la inversión o rentabilidad porcentual, que se refiere a la relación que existe entre la ganancia y la inversión, este refleja el ritmo con que se recupera la inversión a través de la ganancia.

$$\text{Retorno Inversión (\%)} = \frac{G_{\text{con Modificación}} - G_{\text{sin Modificación}}}{I} * 100\% \quad (2.51)$$

2.3.4 Factibilidad ambiental de la propuesta

La factibilidad ambiental de la propuesta se sustenta en el ahorro de un volumen de agua considerable que se deja de extraer del manto freático por concepto de utilizar el condensado en las lavadoras de frutas. Con la implementación de la opción de PML determina el flujo de agua potable que se dejaría de consumir, lo cual permite mitigar la contaminación de los suelos donde se vierten estas corrientes residuales y disminuir el consumo de recursos naturales.

2.4 Implementación

Corresponde a la dirección de la UEB, en función de los resultados y los beneficios técnicos, económicos y ambientales, implementar la opción de PML que se propone.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los principales problemas técnico-ambientales de la entidad objeto de estudio y se presenta una propuesta de opción de producción más limpia que se evalúa de acuerdo a la metodología descrita en el capítulo anterior para finalmente validar dicha propuesta.

3.1. Etapa de planificación y organización

El compromiso social y ambiental de la dirección de la UEB, así como su organigrama aparecen reflejado en los anexos 1a y 1b. La dirección se compromete a usar eficientemente los recursos naturales, materias primas, materiales e insumos; a minimizar y manejar adecuadamente los residuales líquidos, sólidos y emisiones gaseosas; así como a reducir cargas contaminantes emitidas al medio ambiente. Esta proyección se ajusta a la propuesta que se realiza en esta investigación enfocada al mejoramiento del proceso tecnológico, el aprovechamiento de corrientes residuales y la disminución del consumo de portadores energéticos. El control y seguimiento del programa ambiental se realiza a través del Consejo Técnico Asesor y el Consejo Energético, ambos con frecuencia mensual, y en los Consejos de Producción semanales, esto permite rectificar desviaciones y definir nuevas acciones y plazos, para garantizar el proceso de mejora continua.

Como política ambiental se define que “El capital humano como parte fundamental del proceso, una vez capacitado debe sentirse comprometido a alcanzar altos volúmenes de producción con elevada eficiencia, calidad y ahorro de portadores energéticos, adoptando tecnologías y procedimientos en continuo perfeccionamiento y en correspondencia con la legislación vigente para la preservación medioambiental” (Departamento de tecnología, 2015).

3.2. Etapa Pre-evaluativa

En el proceso de aceite los lodos procedentes de las centrífugas que tienen cantidades de aceite esencial y sólidos suspendidos constituyen una corriente de residuales que van a los destiladores y que de no evaporarse completo constituyen un residual perjudicial para el medio ambiente.

3.2.1 Caracterización de la EUB

La Empresa Industrial de Cítricos “Héroes de Girón” en Jagüey Grande en Matanzas está situada en el centro Sur de la Provincia de Matanzas aproximadamente a 900 m de la Autopista Nacional y la posición geográfica es exactamente 22°31'40" de LN y 81°7'40" de LW a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

El entorno de esta empresa está compuesto de la siguiente manera: al noroeste se encuentra el Batey “El Vivero” de aproximadamente 60 viviendas y también en esa dirección a 1 km los envasaderos de Fruta Fresca Jagüey 1 y Jagüey 2 que constituyen fuentes de contaminación. Al norte se encuentra el Hospital Municipal Iluminado Rodríguez y la ciudad de Jagüey Grande que posee tres lagunas de oxidación, todas rehabilitadas. Al sur cruzando la Autopista se encuentra un punto de ventas RUMBOS y un Servicentro ORO NEGRO. En el suroeste de la empresa existen viviendas dispersas.

La UEB fue fundada en en abril de 1983, con un costo de 35 millones de pesos y actualmente procesa alrededor de 400 000 t de frutas cítricas al año para la producción de jugos concentrados, jugo simple y aceite esencial exprimido en frío de naranja, toronja. La misma trabaja durante 10 meses al año con tres turnos de trabajo de 12 horas cada uno y con un total de 534 trabajadores.

Desde 1994 la UEB es miembro de la Asociación Internacional de Productores de Jugo (IFU), pertenece desde 1997 a la SGF (Organización Internacional para el Control Voluntario de Autenticidad e Higiene de las Plantas de Producción). La empresa certificó su Sistema de Calidad según ISO 9002 en Abril del 2001, posteriormente en Abril del 2004 lo certificó según las ISO 9001:2000, desde el año 2003 sus productos tienen la Certificación KOSHER (Para la venta de nuestros productos en la Comunidad Judía).

En la actualidad opta por un Sistema que integra la ISO 9001 y la 18001 de Seguridad y Salud Ocupacional, para ser certificado el próximo año.

La misión fundamental de la Empresa es producir alimentos de la más alta calidad en completa armonía con el medio ambiente, con honestidad y respeto a los clientes. Su principal producción son los jugos simples, concentrados congelados y asépticos de naranja, toronja y piña. Además, se producen aceites esenciales derivados de la naranja y la toronja,

forraje cítrico para alimento animal, pulpas, pastas, néctares y conservas de frutas tropicales (mango, guayaba, y tomate) (Departamento de tecnología, 2015).

3.2.2. Descripción del proceso tecnológico

Las frutas son transportadas desde el frente de cosecha a través de camiones hasta la industria, luego se procede a su pesaje en el basculador y se llevan hasta el área de recepción donde se descargan, en este sitio se toma al azar una muestra de tres unidades independientemente del volumen y la especie, para analizar algunos parámetros de calidad de las frutas, se determina el brix, índice de madurez, acidez, distribución de calibre y contenido de jugo. Desde el área de descargue son transportadas y elevadas por cintas transportadoras y elevadores de cangilones hasta los silos pasando por una mesa de preselección donde son separados palos, piedras, pedúnculos, ramas con hojas que puedan aparecer.

Después de un almacenamiento temporal en los silos, la fruta es trasladada por cintas transportadoras hasta las tres líneas de trabajo, cada una constituida por una lavadora, donde las frutas son lavadas con agua tratada con hipoclorito de sodio, el contenido de cloro en el agua tiene que ser de 0,5 a 1,0 ppm para eliminar posibles bacterias o microorganismos presentes en las frutas. El recorrido continúa hasta la tolva de alimentación a la mesa de selección donde son separados las frutas no aptas para el procesamiento, en mal estado, muy sucias, etc. Después pasan por una máquina de calibración o calibradora que está acoplada a la mesa de selección, esta operación se realiza con el fin de separar la fruta en tres calibres o tamaño y así facilitar la correcta extracción del jugo.

Los grupos de frutas calibradas se distribuyen en las cintas que alimentan los extractores, las que están divididas longitudinalmente de acuerdo al diámetro de las copas, que coinciden con el calibre de las frutas que le llega, cuando el extractor está a máxima capacidad las frutas sobrantes no son asimiladas por él, por lo que regresan a las tolvas mediante cintas transportadoras que se denominan cintas de retorno. Los extractores están divididos en tres líneas de trabajo según el calibre de las frutas:

Línea # 1 --- 10 extractores.

Línea #2 --- 11 extractores.

Línea #3 --- 14 extractores.

Los extractores son los encargados de obtener por separado las tres corrientes principales del proceso de producción: el jugo, la emulsión de agua-aceite y los deshechos.

A partir de los jugos y las pulpas extraídas se obtiene una amplia gama de productos mediante procesos diferentes:

Obtención de jugo concentrado congelado.

Obtención de jugo simple.

Obtención de jugo natural aséptico.

Obtención de puré concentrado aséptico.

Obtención de néctares congelados y asépticos.

Aceites Esenciales: Mientras los extractores están trabajando es inyectada agua en forma de spray alrededor de las copas que son los dispositivos donde son exprimidas las frutas, en el momento de la expresión estas desprenden de su corteza los aceites esenciales, estos son arrastrado por el agua formándose la emulsión agua-aceite. La emulsión proveniente de los extractores pasa primeramente por un filtro rotatorio con el fin de separar las partículas de mayor diámetro, posteriormente son separadas las partículas de un diámetro mayor a 0,2 mm en un filtro parabólico, la mezcla de agua, aceite y lodos es sometida a centrifugación de dos etapas, una centrífuga deslodadora y otra centrífuga pulidora que es la que separa todos los lodos del aceite esencial. Después va al proceso de descerado (formación de ceras) en cámaras de congelación, las ceras se eliminan por decantación. El producto se envasa en bidones de acero con recubrimiento interior de resina epóxica. Una vez llenos se almacenan en cámaras refrigeradas a temperatura entre 5 y 10 °C. Estos aceites tienen gran demanda en el mercado de las pinturas, diluyentes y cosméticos.

Aceite destilado: La fracción de aceite presente en la corriente de lodos de la centrífuga podría ser recuperada a través de un proceso de destilación, lo que permitiría obtener un nuevo producto con características muy similares al aceite exprimido en frío (Departamento de tecnología, 2015).

Los principales desechos que se generan en la industria son los hollejos húmedos resultado del procesamiento de las frutas y las corrientes de líquidos residuales que lo constituyen agua de limpieza general y tecnológica, aguas albañales y aguas amarillas que poseen cantidades de aceites esenciales derivados del proceso de centrifugación. También existen

gases de combustión del proceso de generación de vapor, cabe señalar que no existen desechos peligrosos porque las sustancias peligrosas en la industria son algunas soluciones de limpieza y el amoníaco como refrigerante.

3.2.3. Diagnóstico ambiental

La Empresa ya cuenta con un listado de los diferentes problemas ambientales los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Diagnóstico ambiental.

Actividad	Aspecto asociado	Impacto ambiental	Carácter del impacto	Valoración del impacto
Procesamiento de frutas cítricas para la producción de jugos naturales, concentrados y subproductos	Consumo de fuel oil	Aumento de gastos para la economía nacional, explotación de recursos naturales	Negativo	Moderado
		Emanaciones de gases a la atmósfera, contaminación del aire	Negativo	Moderado
	Consumo de energía eléctrica	Aumento de gastos para la economía nacional, explotación de recursos naturales	Negativo	Moderado
	Consumo de agua	Explotación de recursos naturales	Negativo	Moderado
	Generación de ingresos	Contribución a la economía nacional	Positivo	Elevado
	Empleo de mano de obra local	Mejora de la situación socioeconómica local	Positivo	Elevado
	Generación de residuales	Contaminación de las aguas y los suelos	Negativo	Elevado

Fuente: Departamento de tecnología de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”

Una vez analizada toda la información anterior se decide abordar en este trabajo como problema fundamental la generación de residuales líquidos.

3.2.4. Identificación de los problemas técnico-ambientales

En el proceso de aceite esencial, los lodos procedentes de las centrífugas que tienen cantidades de aceite esencial y sólidos suspendidos constituyen una corriente de residuales que van a los destiladores y que de no evaporarse completamente constituyen un residual perjudicial para el medio ambiente.

Los lodos generados en las centrífugas, son bombeados a los destiladores. Cada tacho tiene un volumen aproximado de $1,7 \text{ m}^3$. Una vez lleno se le alimenta vapor, a una presión de trabajo de 5 kg/cm^2 , hasta que se alcanza la temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. La corriente de evaporación sale por el cuello de ganso situado encima del destilador y va al condensador donde se recuperan los vapores separándose en el tanque florentino. El diagrama de flujo del proceso de destilación se encuentra reflejado en el diagrama de flujo (anexo 2).

En la evaluación técnica del sistema de destilación de los lodos procedentes de las centrífugas se determinó un perfil de temperatura en todo el perímetro del destilador no uniforme, lo cual se refleja en la inestabilidad del tiempo de destilación, así como que no se logra mantener la temperatura constante durante el proceso. Esto influye directamente en el rendimiento y la eficiencia del proceso; y el condensado de vapor no se recupera por lo que se incorpora a las aguas residuales con alta temperatura.

3.3 Etapa de evaluación y estudio de factibilidad

3.3.1 Propuesta de la opción de producción más limpia

Según el problema detectado en el epígrafe 3.2.4, la opción de PML que se propone es el aprovechamiento del condensado, que se genera en la etapa de recuperación de aceite destilado, para ser utilizado en la limpieza de los filtros rotatorios de la línea de aceite exprimido en frío. La propuesta incluye el aprovechamiento de la energía calorífica de esta corriente para calentar los lodos antes de incorporarlos al destilador, lo que mejora la eficiencia del proceso. Esto se logra utilizando un intercambiador de tubo y coraza el cual permite elevar la temperatura de los lodos y disminuir la temperatura del agua de condensado para ser almacenada y utilizada posteriormente en la limpieza de los filtros rotatorios. Esta reutilización sustituye el agua de limpieza que se utiliza actualmente (agua

potable clorada), la cual influye negativamente en la calidad del producto final. La figura 3.1 representa la modificación propuesta al proceso de producción del aceite de destilado.

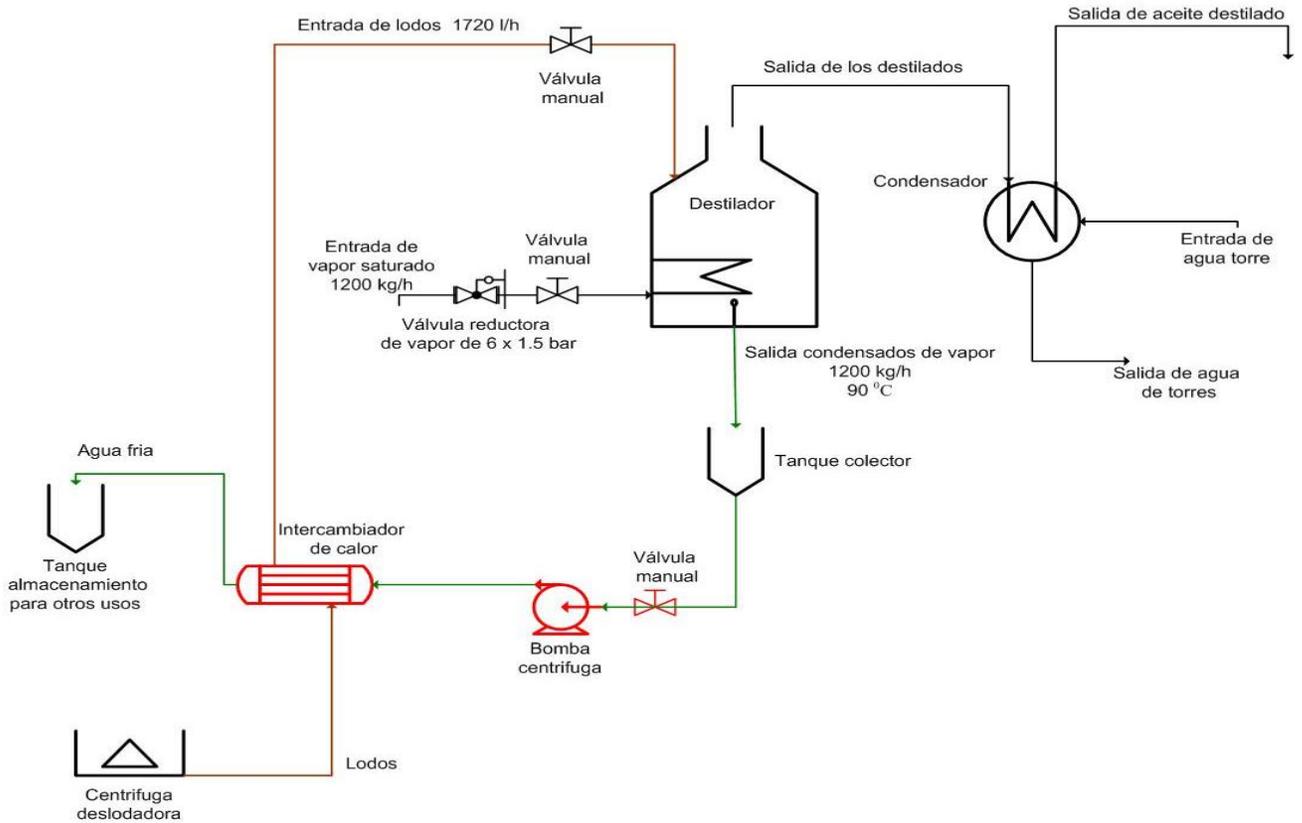


Figura 3.1 Esquema de la opción de PML propuesta al proceso de obtención del aceite esencial destilado.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Evaluación técnica de la propuesta

3.3.2.1. Diseño de sistema de flujo

La figura 3.2 representa el diagrama de flujo del sistema propuesto

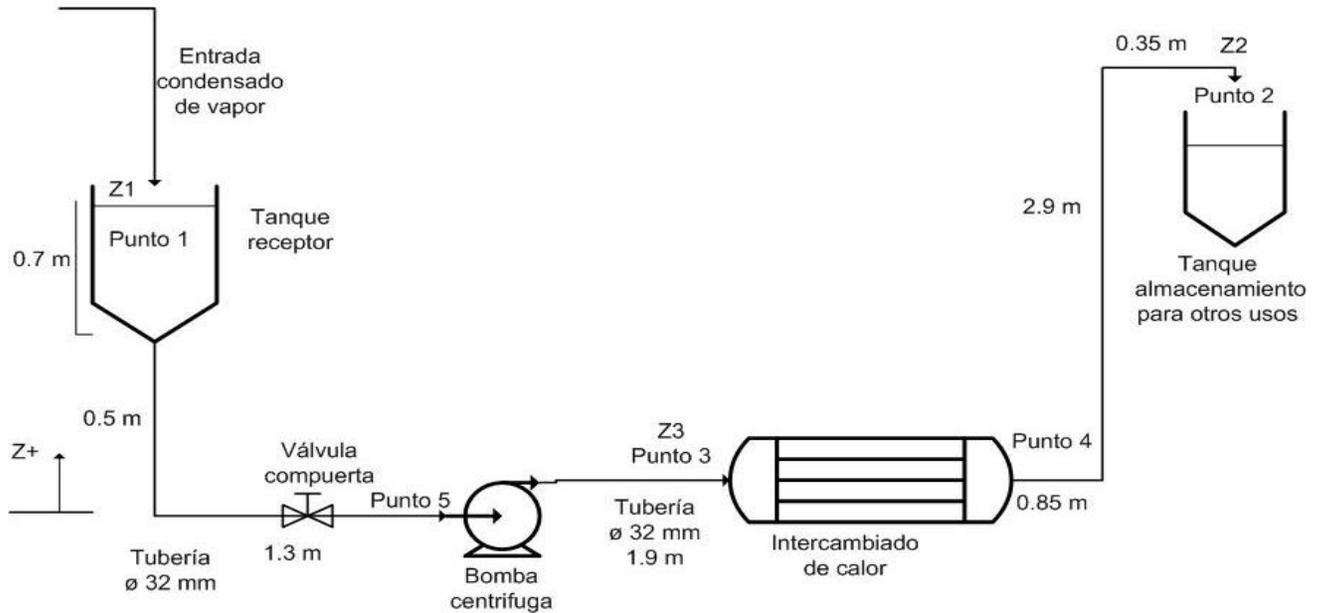


Figura 3.2 Esquema del sistema de flujo de fluidos propuesto

Fuente: Elaboración propia

Para implementar la propuesta la Empresa cuenta con los siguientes insumos:

- Tanque de agua de condensado.
- Intercambiador de calor de tubo y coraza.

Es necesaria la adquisición del resto de los insumos:

- 7,5 m tuberías de hierro fundido (diámetro 32 mm, espesor 3,55 mm), disponibles Almacenes Universales S.A UEB FERRETERIA, 2019.
- Accesorios: válvula (compuerta abierta 3/4) y 4 codos (90° estándar), disponibles en Almacenes Universales S.A UEB FERRETERIA.
- Electrobomba centrífuga Tipo ENR, modelo (32-125A) a 1450 rpm, 130 mm de diámetro del impelente suministrado por EBARA EMICA.

Se requiere la compra de una bomba centrífuga, para el traslado del agua de condensado desde el tanque de condensado hasta el tanque de limpieza de los tambores. La selección de dicha bomba se realiza de acuerdo a la metodología referida en el capítulo 2.

Selección de la bomba para el traslado del agua de condensado al tanque receptor existente

Se aplica el balance de energía mecánica (ec 2.1) entre el tanque de agua de condensado (punto 1) y la entrada al tanque colector (punto 2), considerando las pérdidas por fricción en el Intercambiador de calor, las tuberías y los accesorios. Para ello se consideran dos tramos en el sistema de flujo: tramo AI (1-3) y tramo DI (4-2), debido a la influencia del cambio de temperatura en las propiedades físicas del fluido (Figura 3.2).

Si se conoce que:

- Flujo volumétrico del condensado $q_s = 1200 \text{ kg/h}$ (Departamento de tecnología, 2015)
- Aceleración de la gravedad $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ (Rosabal, 2006)
- El tanque de almacenamiento del condensado es de acero inoxidable AISI 304, cilíndrico y cónico en la parte inferior de tres patas (diámetro - 1,40 m, altura - 1,22 m)

Los datos necesarios para los cálculos se encuentran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades del fluido, datos de operación y diseño para el cálculo del sistema de flujo.

Parámetros	Tramo 1		Tramo 2		Unidades
	Punto 1	Punto 3	Punto 4	Punto 2	
Temperatura (T)	90		30		°C
Viscosidad (μ)	0,000317		0,0008		Pa·s
Densidad (ρ)	965,3		995,7		kg/m ³
Presión (P)	101325	-	-	101325	Pa
Altura (Z)	1,2	0	0	2,9	m
Diámetro (D)	0,032		0,032		m
Longitud (L)	3,7		4,1		m

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos anteriores se determinan los parámetros necesarios para aplicar el balance de energía mecánica al sistema (tabla 3.3)

Tabla 3.3. Cálculos necesarios para el balance de energía mecánica

Parámetros	Tramo 1		Tramo 2		Unidades	Ecuación
	Punto 1	Punto 3	Punto 4	Punto 2		
Velocidad del fluido (v)	0	0,41	0,41		m/s	2.5
Número de Reynolds (Re)	-	40387,03	16507,35		-	2.6
Coefficiente de corrección (α)	-	1	1		-	-
Rugosidad absoluta (ϵ)	-	0,26	0,26		mm	-
Rugosidad relativa (e)	-	0,008125	0,008125			2.7
Factor de Fricción (f)	-	0,047	0,056		-	-

Fuente: Elaboración propia

Debido a que se considera que las características de las tuberías de entrada y salida de la bomba son iguales (diámetro, rugosidad relativa), los parámetros calculados en el tramo 1 (velocidad del fluido, factor de fricción, régimen de flujo) se mantienen constante antes y después de la bomba. El número de Reynolds (Re) es superior a 4 000 en ambos tramos, por lo que se considera régimen turbulento (Rosabal, 2006).

En el sistema se definen como accesorios una válvula de compuerta abierta 3/4 y cuatro codos estándar de 90°. En la tabla 3.4 se muestran los coeficientes de resistencia locales (k) para estos accesorios (Rosabal, 2006).

Tabla 3.4. Coeficientes de resistencia locales de accesorios

Accesorios	Tramo 1			Tramo 2		
	Unidad	k	Total	Unidad	k	Total
válvula de compuerta abierta 3/4	1	0,9	0,9	-	-	-
codos estándar de 90°	1	0,75	0,75	3	0,75	2,25

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las pérdidas totales calculadas se muestran a continuación (tabla 3.5). Las pérdidas por fricción en el Intercambiador de calor se reportan en el Manual A.P.V – IBERICA, S.A, 1980.

Tabla 3.5. Pérdidas por fricción totales del sistema

Parámetros	Tramo 1	Tramo 2	Total (m)
Tuberías	0,0476	0,0628	0,110
Accesorios	0,0525	0,0197	0,0722
Intercambiador de Calor	-	2,5	2,5
Total (m)	0,1	2,582	2,682

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas por fricción del sistema de flujo es de 2,682 m de pérdidas de carga. Como se observa en el tramo 2 se obtiene mayor pérdida por fricción que en el tramo 1, debido a la presencia de un número mayor de accesorios, los cuales ocasionan pérdidas por fricción debido al cambio en la dirección del flujo en forma total o parcial y la turbulencia que generan, causando una pérdida de energía mayor a la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta (Greene, s/a). Además, el paso del fluido por equipos, en este caso el intercambiador, ocasiona pérdidas por fricción que dependen directamente de la caída de presión que sufre el fluido al transitar por dicho equipo (Kern,1999). De ahí que

Carga requerida por el sistema

Al aplicar el balance de energía mecánica se obtuvo que el sistema actual requiere una carga (H_{b_s}) de 4,38 m.

Carga Neta de Succión Positiva del sistema ($NPSH_s$)

La presión de succión de la bomba (P_5) se calcula aplicando y despejando del balance de energía mecánica entre el punto 1 y el punto 5; donde los datos de flujo volumétrico, tuberías y accesorios son los mismos del tramo 1, solo varía la altura final ($Z_5 = 0$ m).

La presión de succión de la bomba (P_5) para las condiciones de operaciones de 111 961 Pa. Si se conoce que la presión de vapor del agua a 90 °C es de 19 920 Pa (Rosabal, 2006), se obtiene una carga neta de succión positiva del sistema de 9,73 m.

Selección de la bomba necesaria

Al evaluar los criterios de selección de bombas se obtiene:

Tabla 3.6. Criterio de selección de la bomba para el sistema propuesto

Parámetros	Sistema	Bomba ⁽¹⁾
q (m ³ /h)	1,2	2
Hb (m)	4,38	5
NPSH	9,73	0,5

¹- Catálogo (anexo 3)

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, se cumple que:

- Carga de la bomba y del sistema: $H_b > H_{bs}$
- Caudal de la bomba y del sistema: $q_b > q_s$
- Carga neta de succión positiva del sistema: $NPSH_s > 0$
- Carga neta de succión positiva de la bomba y del sistema: $NPSH_b \leq NPSH_s$

Con el flujo de operación y el diámetro del impelente (130 mm) se obtiene el NPSH y la carga de la bomba (anexo 3)

Se puede concluir que la bomba seleccionada del Catálogo EBARA EMICA (electrobomba centrífuga ENR de 1450 rpm (32-125A), con un 130 mm de diámetro del impelente, y un costo de \$ 3125) satisface los requerimientos de operación del sistema propuesto, pues se cumplen todos los criterios de selección evaluados.

Potencia consumida por la bomba:

El consumo de potencia de la bomba calculado a partir de la ecuación 2.10 es de 34 W, para una eficiencia de diseño de la bomba de 40% obtenida de las curvas características de las mismas (anexo 3)

3.3.2.2. Evaluación del Intercambiador de calor

Como parte de la opción propuesta está el uso de un Intercambiador de calor para precalentar los lodos provenientes de las centrífugas.

Con el objetivo de disminuir los costos de inversión se propone utilizar para ello un Intercambiador de calor de tubo y coraza existente en el almacén de la Empresa cuyas características son las siguientes:

- ✓ Intercambiador de calor de tubo y coraza con 2 pasos por los tubos y 1 por la coraza.
Calentador Tubular. N/Ref. DT.- 257/JMA/10.301(A.P.V IBERICA, S.A, 1980)

- Número de tubos: 16
- Diámetro de la coraza 0,2 m
- Diámetro de los tubos 0,02 m
- Longitud de los tubos 3,5 m
- Área de transferencia de calor existente $3,52 \text{ m}^2$

Es un intercambiador de triple tubos concéntricos, siendo estos muy utilizados en las industrias alimentarias, ya que son de bajos costes de mantenimiento debido a la ausencia de juntas, altas presiones de trabajo, proceso de productos con partículas o fibras, altas seguridad en procesos asépticos.

En la figura 3.3 se muestra las corrientes de entrada y salida del Intercambiador de calor.

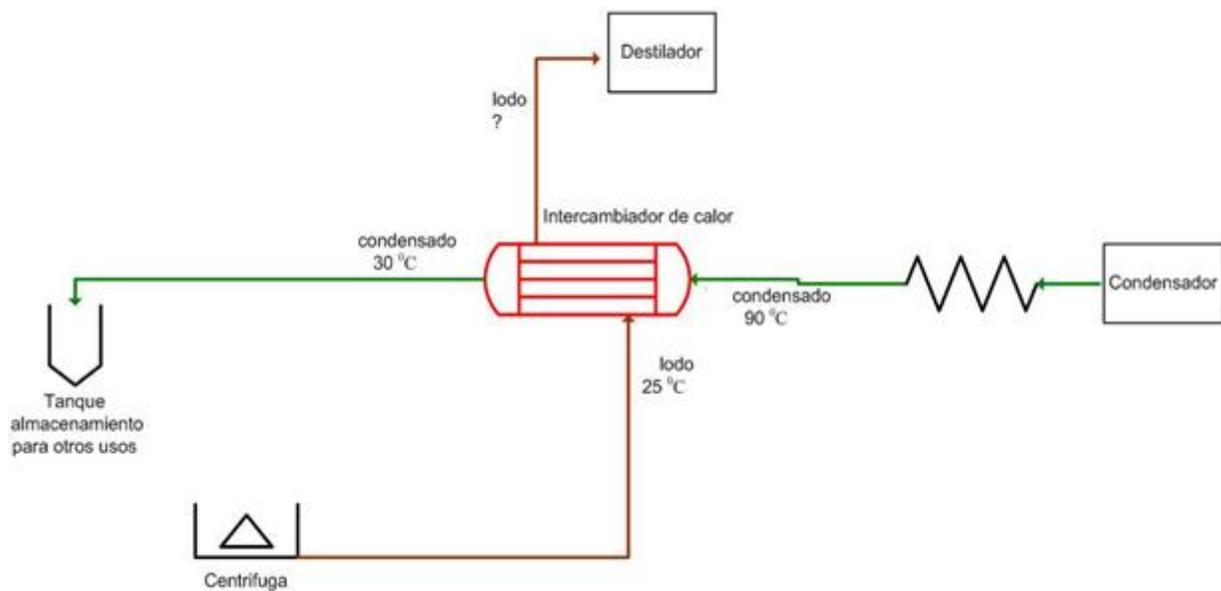


Figura 3.3. Diagrama de flujo del Intercambiador de calor.

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la temperatura de salida de los lodos del intercambiador

Se sabe que:

- Fluido caliente (agua de condensado)
- Fluido frío (lodos)

Según Kern (1999), las pérdidas por radiación de los intercambiadores usualmente son insignificantes comparadas con la carga térmica transferida en el equipo, por lo que se consideran despreciables las pérdidas en el Intercambiador de calor ($Q_{abs} = Q_{ced}$). Se conoce además que el agua del condensado debe salir a una temperatura de 30 °C (T_2) aproximadamente para que pueda ser utilizada con el objetivo propuesto; y conociendo además la temperatura de salida del agua del condensador ($T_1 = 90$ °C), así como la temperatura de entrada de los lodos al destilador ($t_1 = 25$ °C), (figura 3.3) se obtiene la temperatura de salida de los lodos del intercambiador (t_2) por la expresión:

$$w \cdot Cp_{lodo}(\Delta T_{lodo}) = W \cdot Cp_{cond}(\Delta T_{cond}) \quad (3.1)$$

$$w \cdot Cp_{lodo}(t_1 - t_2) = W \cdot Cp_{cond}(T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

Tabla 3.7. Cálculo de la temperatura de salida de los lodos del Intercambiador de calor

Parámetros	Lodos	Condensado
flujo (kg/h)	1720	1200
Cp (kcal/kg°C)	0,7 ⁽⁴⁾	1 ⁽³⁾
T _e (°C)	25 ⁽¹⁾	90 ⁽¹⁾
T _s (°C)	54,3	30 ⁽²⁾

Fuente: ¹- tomada en el proceso, ²- estimada, ³- Coronel, 2014, ⁴Departamento de Tecnología, 2015

Cálculo del área necesaria del Intercambiador de calor para el sistema propuesto

A continuación, se presenta los resultados obtenidos según la metodología propuesta en el capítulo 2 para determinar el área del Intercambiador de calor que se necesita para obtener la temperatura deseada.

Según los resultados del método del número de unidades de transmisión (ϵ - NTU), el área del Intercambiador de calor existente en la industria ($A_1 = 3,52$ m²) es mayor que el área de transferencia de calor necesaria para obtener la temperatura deseada ($A_2 = 3,39$ m²), por lo

que es factible técnicamente para la propuesta que se realiza. El intercambiador existente proporciona un sobrediseño (SD) de un 3,8 % para la operación que se propone, según la siguiente expresión:

$$SD (\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_2} \quad (3.3)$$

Tabla 3.8. Resultados de la evaluación del intercambiador

Parámetros	Valor
Q	72 000 kcal/h
$Q_{\text{máx}}$	78 000 kcal/h
C_h	1200kcal/h°C
C_c	1204 kcal/h°C
$C_{\text{mín}}$	1200kcal/h°C
$C_{\text{máx}}$	1204 kcal/h°C
C_r	0,99
U_D	180 kcal/hm ² °C
ξ	92,3 %
E	0,1204
NTU	0,509
A	3,39 m²

Fuente: Elaboración propia.

Según Kern (1999) los intercambiadores de calor de tubo y coraza admiten hasta un 15 % de sobrediseño, por lo que se puede concluir que el equipo de intercambio de calor existente en la Empresa puede ser utilizado para la opción propuesta.

Criterio de adaptabilidad del intercambiador de calor disponible

Para el aprovechamiento de la energía calorífica del condensado para calentar los lodos antes de incorporarlos al destilador se determina la adaptabilidad de los calentadores existentes en la empresa, empleando para ello la metodología establecida por Kern (1999) y descrita en el epígrafe 2.3.2.3, mediante el uso de la herramienta de cálculo Microsoft Excel. La tabla 3.9 muestran los principales resultados obtenidos. Los resultados en su totalidad se muestran en el anexo 4.

Tabla 3.9. Resultados de la determinación de la adaptabilidad del intercambiador de calor.

Variable	Símbolo	Valor	U/M
Fluido por los tubos (frío)	Lodos		
Flujo	w	1200	kg/h
Temperatura inicial	t_1	25	°C
Temperatura final	t_2	54,3	°C
Fluido por la coraza (caliente)	Condensado		
Flujo de condensado	W	1720	kg/h
Temperatura inicial	T_1	90	°C
Temperatura final	T_2	30	°C
	Resultados		
Media logarítmica de la diferencia de temperatura	LMTD	15,6	°C
Calor absorbido	Q	72 000	kcal/h
Área de transferencia de calor requerida	A	3,5	m ²
Coefficiente total limpio de transferencia de calor	U_C	142,3	Btu/(h.pie ² .°F)
Coefficiente total de diseño de transferencia de calor (calculado)	U_D	36,84	Btu/(h.pie ² .°F)
Factor de obstrucción calculado	$R_{d_{calc}}$	0,020	(h.pie ² .°F)/Btu
Caída de presión total en los tubos	ΔP_T	3,84	lbf/plg ²
Caída de presión en la coraza	ΔP_s	0,056	lbf/plg ²

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la adaptabilidad de los intercambiadores de calor, se considera un caudal de lodos de 1200 kg/h y un calentamiento desde 25 °C hasta 54,3 °C. Puede observarse que a partir del área de transferencia de calor de estos equipos (3,5 m²) y el calor intercambiado en los mismos (72 000 kcal/h) se obtiene un coeficiente total de diseño de transferencia de calor (U_D) de 36,8 Btu/h.pie².°F, siendo el coeficiente total limpio de transferencia de calor (U_C) de

142,3 Btu/(h.pie².°F). El factor de obstrucción calculado es de 0,02 h.pie².°F/Btu. La caída de presión total en los tubos (ΔP_T) es de 3,84 lbf/plg², mientras que se alcanza 0,056 lbf/plg² de caída de presión para el lado de la coraza (ΔP_s). El área del intercambiador recalculada es de 3,5 m², aún inferior al área del Intercambiador de calor existente en la industria (3,52 m²), garantizando menos 15 % de sobrediseño por lo que puede considerarse aceptable este criterio de selección.

Además se puede observar en la tabla anterior que:

- el coeficiente total limpio de transferencia de calor U_C excede suficientemente al coeficiente total de diseño U_D , de manera que el factor de obstrucción (R_d), que es una medida del exceso de superficie, garantiza la correcta operación de los calentadores.
- el factor de obstrucción calculado, es mayor que el factor de obstrucción requerido según Kern (1999) para este tipo de intercambiador de calor, que es 0,0035 h.pie².°F/Btu
- la caída de presión total en los tubos y la caída de presión para el lado de la coraza no exceden la permitida para las dos corrientes, la cuales de 10 lbf/plg² según lo establecido por Kern (1999).

Como se cumplen las condiciones de significación en la determinación de la adaptabilidad del calentador en existencia para su nuevo uso, este equipo se considera apropiado para ser empleado bajo las condiciones de proceso para las que han sido evaluados.

3.3.3. Factibilidad económica de la propuesta

Para desarrollar la evaluación económica de la propuesta de PML se realiza el análisis de la factibilidad de la misma por medio de la determinación del Valor Actual Neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el plazo de recuperación de la inversión y el retorno de la inversión, para lo cual se aplica la metodología de cálculos económicos como se muestra en el capítulo 2.

La inversión se determinó a partir del costo de adquisición del equipamiento necesario para poner en práctica la propuesta sin tener en cuenta los costos de instalación y montaje ya que el mismo se lleva a cabo por la brigada de mantenimiento de la Empresa.

El monto total de la inversión se describe en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Gastos de la inversión

Inversión Total				
Elementos	Unidad de medida	Cantidad	Costo	Costo total
válvula de compuerta abierta 3/4	u	1	85	85
Codo de 90° estándar	u	4	3,5	14
Bomba centrífuga	u	1	3125	3125
Tuberías de hierro fundido 1 1/4 plg	m	7,8	8,75	68,25
Costo total de adquisición o Inversión				3292,25

Fuente: Departamento de Economía de la UEB

El cálculo de los costos fijos, los costos variables y el costo de producción total durante la campaña de noviembre a diciembre del 2018 fueron brindados por el departamento de economía de la Empresa.

Se realiza el cálculo del VAN cuyo resultado se muestra en la tabla 3.11

Tabla 3.11. Resultados del cálculo del VAN

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión \$	3292,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pagos totales \$	3292,25	1074,96	1433,28	1 433,28	1 433,28	1 433,28	1 433,28	1 433,28	1 433,28	1 433,28	1 433,28
Cobros totales \$	0,00	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10	2227,10
Mov. De fondos \$	-3292,25	1152,14	793,82	793,82	793,82	793,82	793,82	793,82	793,82	793,82	793,82
Mov. De fondos acumulado \$	-3292,25	-2140,11	-1346,29	-552,47	241,34	1035,16	1828,98	2622,80	3416,62	4210,44	5004,26
Mov de fondos actualizado \$	-3292,25	1047,40	656,05	596,41	542,19	492,90	448,09	407,35	370,32	336,66	306,05

Fuente: Elaboración propia

El VAN ofrece un valor positivo de \$1911 y en el orden de la inversión lo que indica que el proyecto generara más efectivo que el que se necesita para reembolsar su deuda y cubrir el interés correspondiente, por lo que se puede aceptar el proyecto de inversión.

A su vez el Retorno de la Inversión es de 67,6% lo que significa el porciento de la inversión que retorna cada año a través de la ganancia.

La Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) es de 12 %, estos resultados indican que el dinero actualizado permite cubrir el interés anual del 10 %, así como la inversión que se propone, la cual puede ser recuperada en un período (PRI) de 0,73 años (\approx 8 meses con 22 días). Por tanto, resulta factible económicamente la propuesta de PML.

3.3.4 Beneficios ambientales de la propuesta

El beneficio que trae consigo esta propuesta para el medio ambiente viene dado por el hecho de que se dejan de consumir del manto $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ lo que para una campaña de 40 días y 20 horas de trabajo diarias equivale a 960 m^3 de agua por campaña lo suficiente para abastecer a una población de 3840 habitantes con un consumo de $0,25 \text{ m}^3$ per cápita lo que contribuye a preservar este valioso recurso. (Manual de Producción Más Limpia en el Sector Industrial Citrícola, 2009)

3.4 Conclusiones parciales

1. Se propone como opción de PML el uso del condensado que se genera en el destilador de la etapa de aceite destilado, para la limpieza de los filtros rotatorios de la línea de aceite exprimido en frío.
2. Para la evaluación de la propuesta se diseña un sistema de flujo y se selecciona una bomba centrífuga Tipo ENR, modelo (32-125A) a 1450 rpm, suministrado por EBARA EMICA, que satisface los requerimientos técnicos operacionales del sistema con una potencia de 34 W.
3. Se evalúa por el método de la efectividad y el número de unidades de transmisión ($\epsilon - \text{NTU}$) el Intercambiador de calor existente en la UEB para ser utilizado en el sistema de flujo propuesto donde el área efectiva del mismo garantiza un sobrediseño adecuado para las condiciones de operación.
4. Se estudian y validan los criterios de adaptabilidad del intercambiador y se corrobora que puede ser instalado para la función que se propone.
5. La valoración económica de la propuesta es aceptable teniendo en cuenta los indicadores de factibilidad ($\text{VAN} = \$1\,911$, $\text{PRI} = 0,73$ años \approx 8 meses con 22 días, $\text{TIR} = 12\%$ y $\%$ de Retorno de la Inversión = $67,6\%$), por tanto, se valida la propuesta.

CONCLUSIONES

La investigación ha estado dirigida fundamentalmente a la evaluación de una propuesta de PML en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”, a partir de la cual se concluye que:

1. La propuesta de opción PML permite recuperar el condensado que se genera en el proceso de aceite destilado en la etapa de limpieza y precalentamiento de los lodos, por lo que queda validada la hipótesis.
2. Para el aprovechamiento del condensado se diseña un sistema de flujo el cual requiere 4,38 m de carga de bombeo y proporciona 2,682 m de pérdidas por fricción totales, para lo cual se selecciona una bomba centrífuga (Tipo ENR, modelo 32-125A, 1450 rpm, suministrado por EBARA EMICA, 34 W de potencia) que cumple con los criterios de selección (flujo, carga de la bomba y NPSH) para el trasiego de agua de condensado desde el tanque receptor hasta el tanque de almacenamiento para otros usos.
3. El aprovechamiento del Intercambiador de tubo y coraza existente en la UEB es técnicamente factible ya que el área necesaria ($3,39 \text{ m}^2$) es menor que la real ($3,5 \text{ m}^2$) lo que garantiza un 3,8 % de sobrediseño; además se cumplen todos los criterios de adaptabilidad los cuales responden a los factores de obstrucción ($R_d \text{ calculado} > R_d \text{ requerido}$), los coeficientes de transferencia de calor ($U_C > U_D$) y las caídas de presión por los tubos y la coraza ($\Delta P \text{ calculada} > \Delta P \text{ permitida}$).
4. La propuesta realizada es viable económicamente ya que los indicadores obtenidos son factible: VAN positivo de \$ 1911, Plazo de Recuperación de la Inversión de 8 meses con 22 días (0,73 años), Tasa de Rentabilidad de la Inversión de 12 % mayor al interés y un Retorno de la Inversión de 67,6 %.

RECOMENDACIONES

Como resultado de la investigación desarrollada y teniendo en cuenta los diferentes resultados obtenidos, el autor recomienda:

1. Implementar a mediano plazo, por parte de la dirección de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”, la opción de PML propuesta para que sea considerada en la política ambiental y en la estrategia de gestión ambiental de la Empresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- A.P.V - IBERICA, S.A. Instrucciones de mantenimiento y servicio. Madrid, España 1980.
- Assenova, M., Georgiev, Z., & Dunjic, B. (2016). Application of Resource Efficient and Cleaner Production Approach in the Accommodation Sector of the Balkan Region. *European Journal of Sustainable Development*, 5(4), 431-442.
- Bermúdez Hernández, Y..Producción más Limpia en el Sector Biotecnológico. *Journal of Technology Management & Innovation*, ISSN-e 0718-2724, N°. Extra 8, 2, 2013 (Ejemplar dedicado a: Special Issue ALTEC: Social and Sustainable Project, Knowledge and Innovation Management), págs. 298-309.
- Bousbia, N., Vian, M., Ferhat, M., Meklati, B. y Chemat, F. (2009). *A new process for extraction of essential oil from Citrus peels: Microwave hydrodiffusion and gravity. Journal of Food Engineering*. 90: 409-413.
- Branan, C. (2002). *Rules of Thumb for Chemical Engineers. A manual of quick, accurate solutions to everyday process engineering problems*. Houston: Editorial Gulf Publishing Company.
- Buchel, A. (1989). *Flavoring with Citrus Oil. Perfumer & Flavorist* 14: 22-26.
- Cabello, J., Sagastume, A., García, D., Cogollos, J., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2015). Bridging universities and industry through cleaner production activities. Experiences from the Cleaner Production Center at the University of Cienfuegos, Cuba. *Journal of cleaner production*, 108, 873- 882.
- Cabello, J., Sousa, V., Sagastume, A., Alvarez, M., Haeseldockx, D., & Vandecasteele, C. (2016): Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. *Journal of cleaner production*, 137(20), 803-812.
- Cardoso, G., Vendrametto, O., Alencar, I., Palmeri, N., & Cezar, W. (2016). *Environmental impact reduction as a result of cleaner production implementation: a case study in the truck industry. Journal of Cleaner Production*, 129(25), 681-692.
- Cerón, I. X., Cardona, C. A., & Toro, L. A. (2012). Simulación del proceso de concentración de aceite esencial de Cidrón (*Lippiacitriodora*) por destilación molecular de película descendente. *Ingeniería Y Competitividad*, 120(1), 107–120. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10893/5497>

- Coronel, J.F. (2014). Colección de Tablas, Gráficos y Ecuaciones de Transferencia de Calor. Grupo de termotecnia. Departamento de Tecnología. Universidad de Sevilla. Versión 3.5.
- Departamento de tecnología. (2015). Descripción del proceso productivo de la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”. Documento de trabajo.
- Díaz, Y. (2014). Evaluación de la eficiencia de la limpieza mecánica del intercambiador de calor en espiral de la segunda etapa de separación en la batería central de la EPEP-C. Matanzas. Tesis en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de pozos y producción de petróleo. Universidad de Matanzas.
- Dodic, S., Vucurovic, D., Popov, S., Dodic, J., & Zavargo, Z. (2010). *Concept of cleaner production in Vojvodina. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1629-1634.
- Dumke, D., Alves, F., Sena, G., & Gomes Da Silva, J. (2007). *Aplicação da produção mais limpa e numa empresa como ferramenta de melhoria contínua. Produção*, 109-128.
- Eg, S., Meng, X., Yin, H., Tam, C., & Sun, L. (2010). Impact of cleaner production on business performance. *Journal of Cleaner Production*, 18, 975-983.
- Fernández, J., Linhares, E., Sousa, A., & Rodríguez, M. (2015). Um estudo da Produção Mais Limpia e Gestão Ambiental. *Revista Augustus*, 52-64.
- Gemina (2015). Catálogo General. Procesos Alimentarios S.L. Servicios, Maquinarias e Industrias. Murcia, España.
- Greene, R. W., (s/a). Válvulas. Selección, uso y mantenimiento. New York: MC Graw - Hill. 215p
- Hamblin, D. (2016). *Factors impacting on cleaner production: Case studies of Chinese pharmaceutical manufacturers in Tianjin, China. Journal of Cleaner Production*, 131, 121- 132.
- Henriques, J., y Catarino, J. (2014). *Sustainable Value and Cleaner Production e research and application in 19 Portuguese SME. Journal of Cleaner Production*, 96(15), 379-386.
- Hernández, A. L. y Lesino, G. (2010). Diseño, Construcción y evaluación Termoenergética de un Intercambiador de calor Aire – Aire de Flujo Cruzado.

- Argentina. Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Hernandez11/publication/259528121>. Consultado el 27 de enero 2019.
- Hernández. Y. (2013). Producción más Limpia en el Sector Biotecnológico. *Journal of Technology Management & Innovation*, ISSN-e 0718-2724, N°. Extra 8, 2, 2013 (Ejemplar dedicado a: Special Issue ALTEC: Social and Sustainable Project, Knowledge and Innovation Management), págs. 298-309.
 - Imbert, J.; Guillen, R. (2011). Evaluación de un recuperador de calor en una industria frigorífica. Universidad de Oriente. Centro de Estudios de Refrigeración. Cuba.
 - Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Editorial Prentice Hall, 7th Ed. USA.
 - Izquierdo Millán, Marcelo (2001). Ingeniería térmica y de fluidos. Intercambiadores de calor. Editorial Leganés.
 - Jaramillo, O. A. (2008). Manual de intercambiadores de calor. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://www.cie.unam.mx/ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>. Consultado el 29 de enero 2019.
 - John Bean Technologies Corporation (2008). Sistemas de recuperación de aceites esenciales. Florida .USA
 - Jones, J. A. (2003). *Heat Transfer Handbook*, Department of Mechanical Engineering, Duke University Durham. North Carolina.
 - Kern, D. Q. (1999). Procesos de Transferencia de Calor. Editorial McGraw Hill Book Company INC. México.
 - Kjaerheim, G. (2005). Cleaner production and sustainability. *Journal of cleaner production*, 13, 329- 339.
 - Li y Hamblin, D. (2016). Factors impacting on cleaner production: Case studies of Chinese pharmaceutical manufacturers in Tianjin, China. *Journal of Cleaner Production*, 131, 121- 132.
 - Lin, R., Kim, H., & Yong, G. (2013). *Market demand, green product innovation, and firm performance: evidence*. *Journal of Cleaner Production* 40, 101-107.
 - Luken, Berkel, V., Leuenberger, & Schwager. (2015). *A 20-year retrospective of the National Cleaner Production Centres programme*. *Journal of cleaner production*, 112.

- Manual de Producción Más Limpia en el Sector Industrial Citrícola. 2009. [en línea] [Consulta: 11 de febrero del 2019]. Disponible en: http://www.cp-latin-unido.net/docs-trabajo/et_Al_26.pdf.
- McCabe, W. L.; Smith, J. C. y Harriott, P. (1998). Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw Hill. Madrid, España.
- McCain G., Janie. Afectaciones del Medio Ambiente. [en línea] [febrero 2005]. Disponible en <http://www.umng.edu.co/www/section-190.jsp>[consulta: 20 enero 2019].
- Nadour, E. C. (2012). Agencia de Protección Ambiental Ministerio de Ambiente y Espacio Público. Guía práctica y estudio de casos, Producción Más Limpia, Programa Buenos Aires produce más limpio.
- Nakatsu, T., Lupo, A., Chinn, J., Kang, R. (2000). *Biological activity of essential oils and their constituents*. Elsevier Science B.V. USA. 21: 571-623.
- Oliva, L. (1988). Explotación y materiales constructivos del generador de vapor, Ediciones ISPJAM.
- ONUDI. (2007). Manual de Producción Más Limpia para el sector Industrial Citrícola. Cuba. p 100-102.
- Paredes, P. (2014). Producción más limpia y el manejo de efluentes en plantas de harina y aceite de pescado. *Industrial Data*, 72-80
- Pérez, Francisco P. (2011). Medidas de caracterización de un intercambiador en espiral. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial, Madrid España.
- Perry, Robert y Green, Don W. (2008). *Chemical Engineers Handbook*. Editorial Mc. Graw Hill Incorporation.
- Peters, M *et al.*, 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Fourth Edition. International Edition. McGraw Hill Book. Chemical Engineers Serie.
- PNUMA. (2006). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Un paquete de recursos de capacitación: PML. Documentos técnicos de apoyo. Parte 3. 28 p.

- Rizo, L. B. (2008). Evaluación energética en la planta de procesamiento de crudo de la EPEP Centro. Tesis presentada en opción al título de especialista en perforación y extracción en pozos de petróleo y gas. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Matanzas, Cuba.
- Rodríguez, T. (2005). El mantenimiento predictivo con enfoque de producción más limpia agregados del generador de vapor de centrales termoeléctricas. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Especialidad Ingeniería Química. Universidad de Girona.
- Rosabal, J.M. (2006). Hidrodinámica y separaciones mecánicas. Ciudad de la Habana. Editorial Félix Varela. 2da edición.
- Rossi, P. C., Willnecker, A. A., Berti, J., Borgarello, A. V, Mezza, G. N., &Pramparo, M. C. (2011). *D-limonene and geranial fractionation from lemon essential oil by molecular distillation*. *Latin American Applied Research*, 41, 81–85. Retrieved from <http://www.scielo.org.ar/pdf/laar/v41n1/v41n1a12.pdf>.
- Rossi, P., Gayol, M. F., Renaudo, C., Pramparo, M. C., Nepote, V., &Grosso, N. R. (2014). *The use of artificial neural network modeling to represent the process of concentration by molecular distillation of omega-3 from squid oil*. *Grasas Y Aceites*, 65(4). <https://doi.org/10.3989/gya.0231141>.
- Roswell Kant, Frank. (2006). Producción Más Limpia. [en línea] marzo 2008. Disponible en <http://www.conep.org.pa/prodlimpia/templates/quepl.php>
- Rueda, Y., Manecilla, L., Parada, D.Y. (2007). Estudio del aceite esencial de la cáscara de la naranja dulce (*Citrus Sinensis*, variedad Valenciana) cultivada en Labateca (Norte de Santander, Colombia). Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología y Química. Revista Bistua Vol.5 No.1. ISSN 0120-4211
- Serrano, J.H.; Tortosa, B.I *et al.*, (2006). Protección Ambiental y producción + limpia. En Suplemento Especial Universidad para todos. Parte 1. La Habana: Academia. 16 p. ISBN 978-959-270-097-0.
- Severo, E., Ferro, J., Henri, E., &Hermann, C. (2015). *Cleaner production, environmental sustainability and organizational performance: an empirical study in the Brazilian Metal-Mechanic industry*. *Journal of Cleaner Production*, 118-125.

- Shilling, R. (2000). *A new perspective on the impact of fouling on the performance of finned heat exchangers in comparison to heat exchangers without extended surfaces*. Editorial Brown Fintube Company. Houston, Texas, USA.
- Torres Martínez, L. G. (2013). Separación de compuestos terpénicos del aceite esencial de naranja (*Citrus sinensis*) mediante destilación molecular y fraccionada. Universidad de Guadalajara.
- Torres, E.; Soto, J.A.; Martínez, M.T. (2004). Manual de intercambiadores de calor. México.
- Tovar, L. P., Aucia, G., Pinto, M. F., Wolf-Maciel, M. R., Esar, C., Batistella, B., & Maciel-Filho, R. (2011). *Short-Path-Distillation Process of Lemongrass Essential Oil: Physicochemical Characterization and Assessment Quality of the Distillate and the Residue Products*. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 8185–8194. <https://doi.org/10.1021/ie101503n>.
- Towler, G. y Sinnott, R. (2008). *Chemical Engineering Desing. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Desing*. Editorial Butterworth-Heinemann. Estados Unidos.
- *United Nations Industrial Development Organization [UNIDO]; United Nations Environment Programme [UNEP]*. (2010). *Joint UNIDO- UNEP Programme on Resource Efficient and Cleaner Production in Developing and Transition Countries: Programme Strategy*. Disponible en [www.unep.org: http://www.unep.org/recp/](http://www.unep.org/recp/)
- Van Berkel, R. (2015). *Resource efficient and cleaner production (RECP) for better enterprises, cleaner environment and green Economy*. Moldova.
- Van de Braak, S., Leijten, G. (1999). *Essential Oils and Oleoresins: A Survey in the Netherlands and other Mayor Markets in the European Union*. CBI, Centre for the Promotion of Imports from Developing Countries, Rotterdam. p. 116.
- Van Hoof, B., & Herrera, C. (2007). La evolución y el futuro de la Producción Más Limpia en Colombia. *Revista de Ingeniería*. (26), 101-117.
- Wahala, W., Edirisinghe, L., Peiris, V., & Kumarasena, N. (2012). Resource efficient cleaner production (RECP) as a potential tool for greening the hospitality industry in Sri Lanka. *International Forestry and Environment Symposium*, 163.

ANEXOS

Anexo 1a: Compromiso de la UEB.

- **Misión**

Producir jugos y otros derivados de frutas cítricas y tropicales que satisfagan las necesidades siempre crecientes del cliente con el sabor, color, y aromas exclusivos de Jagüey Grande.

- **Visión**

Contar con la profesionalidad, disciplina, consagración, eficiencia, alto sentido de pertenencia, calidad y competitividad del capital humano con que disponemos.

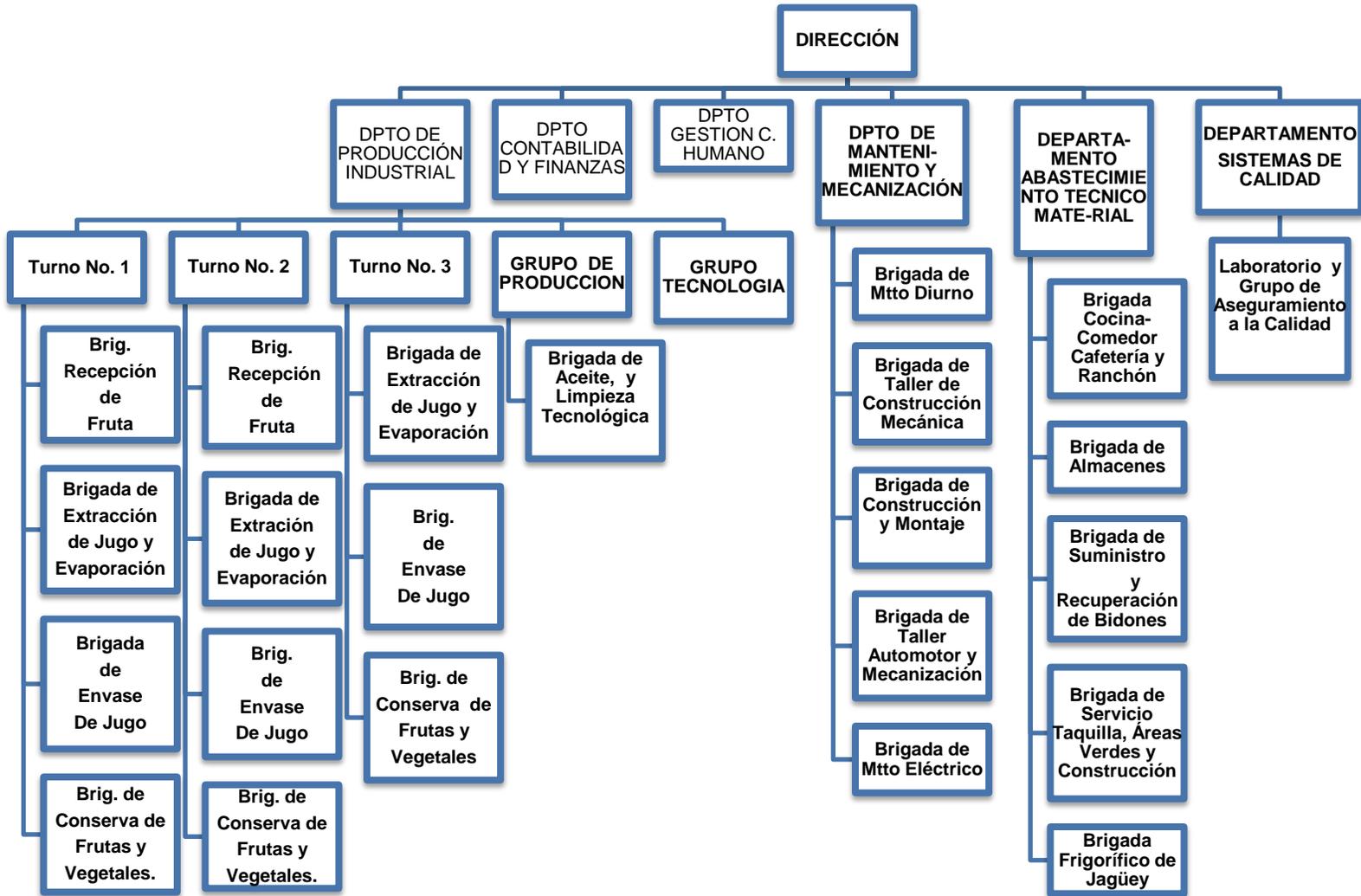
- **Compromiso Social de la UEB**

- ✓ Procesar industrialmente frutas y vegetales para comercializar de forma mayorista, jugos concentrados y naturales, jugos simples, celdillas, aceites y derivados para los destinos contratados en moneda nacional y en divisas a través de la comercializadora de la empresa.
- ✓ Producir y comercializar de forma mayorista en moneda nacional, subproductos de la industria y hollejo húmedo a entidades del sistema del Ministerio de la Agricultura.
- ✓ Prestación de servicios en divisas de vapor, refrigeración, seguridad y protección, energéticos, comedores, abasto de agua dura y tratada, recogida de desechos sólidos, mantenimiento y reparación de obras menores y análisis de laboratorio, talleres para mantenimiento y reparación del parque automotor, servicio de instrumentación, enrollado y mantenimiento mecánico a la planta “La Estancia”
- ✓ Comercializar de forma minorista en moneda nacional a los trabajadores de la entidad, productos agropecuarios excedentes del autoconsumo y de los procesos industriales.

- ✓ Comercializar de forma minorista artículos industriales y víveres a los trabajadores de la unidad, a través de la tienda de estímulos de la propia entidad, según nomenclatura aprobada, en moneda nacional.
- ✓ Brindar servicios de construcción, reparación y mantenimiento de obras menores al sistema y a las viviendas de los trabajadores de la unidad en moneda nacional.
- ✓ Prestar servicios en moneda nacional de comedor, cafetería, recreación, reparaciones menores de equipos, a trabajadores de la entidad.
- ✓ Prestar servicios de fuerza de trabajo en actividades agrícolas durante el periodo en que la industria se encuentre paralizada por falta de frutas, debido a las afectaciones climatológicas o culminación de campañas.
- ✓ Usar eficientemente los recursos naturales, materias primas, materiales e insumos.
- ✓ Minimizar y manejar adecuadamente los residuales líquidos, sólidos y emisiones gaseosas.
- ✓ Reducir las cargas contaminantes emitidas al medio ambiente.
- ✓ Educar y capacitar en temas ambientales al capital humano y exhortarlo a participar en las soluciones a los problemas ambientales de la entidad.

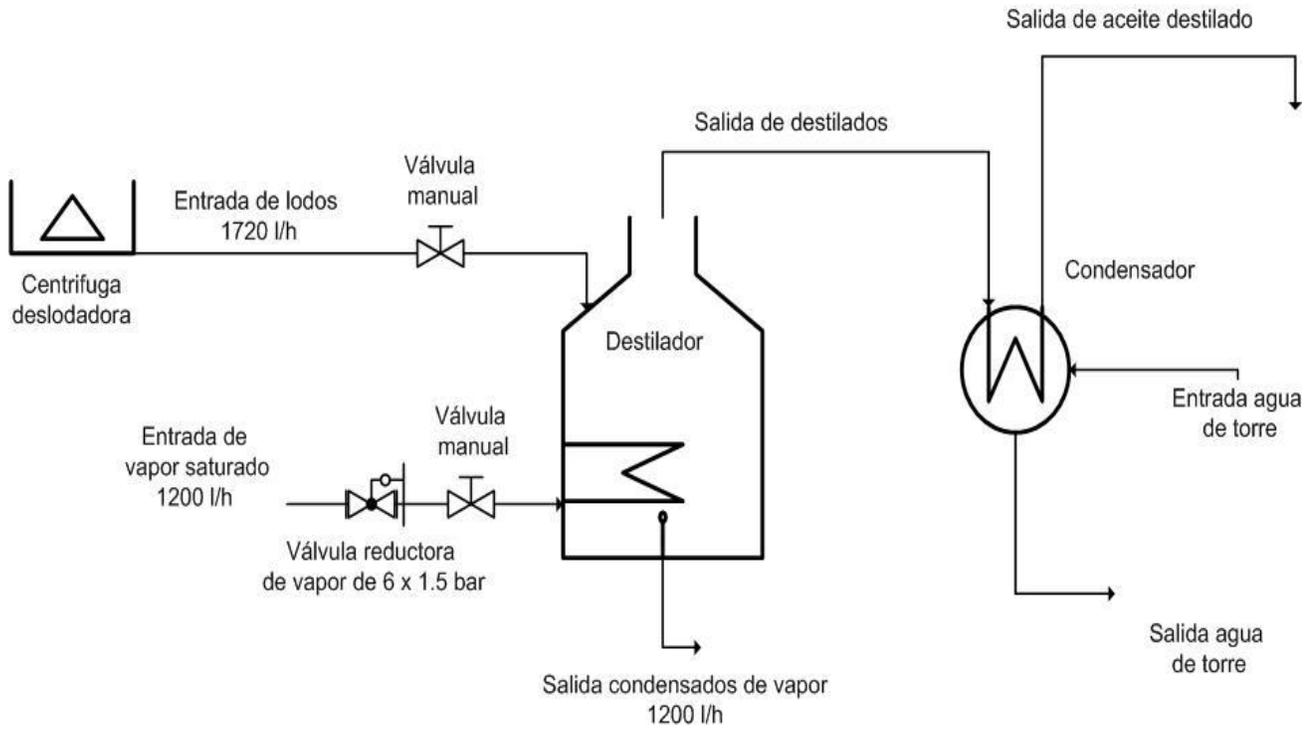
Política Ambiental: El capital humano como parte fundamental del proceso, una vez capacitado debe sentirse comprometido a alcanzar altos volúmenes de producción con elevada eficiencia, calidad y ahorro de portadores energéticos, adoptando tecnologías y procedimientos en continuo perfeccionamiento y en correspondencia con la legislación vigente para la preservación medioambiental.

Anexo 1b: Estructura organizativa de laUEB



Anexo 2: Esquema actual del proceso de obtención del aceite esencial destilado

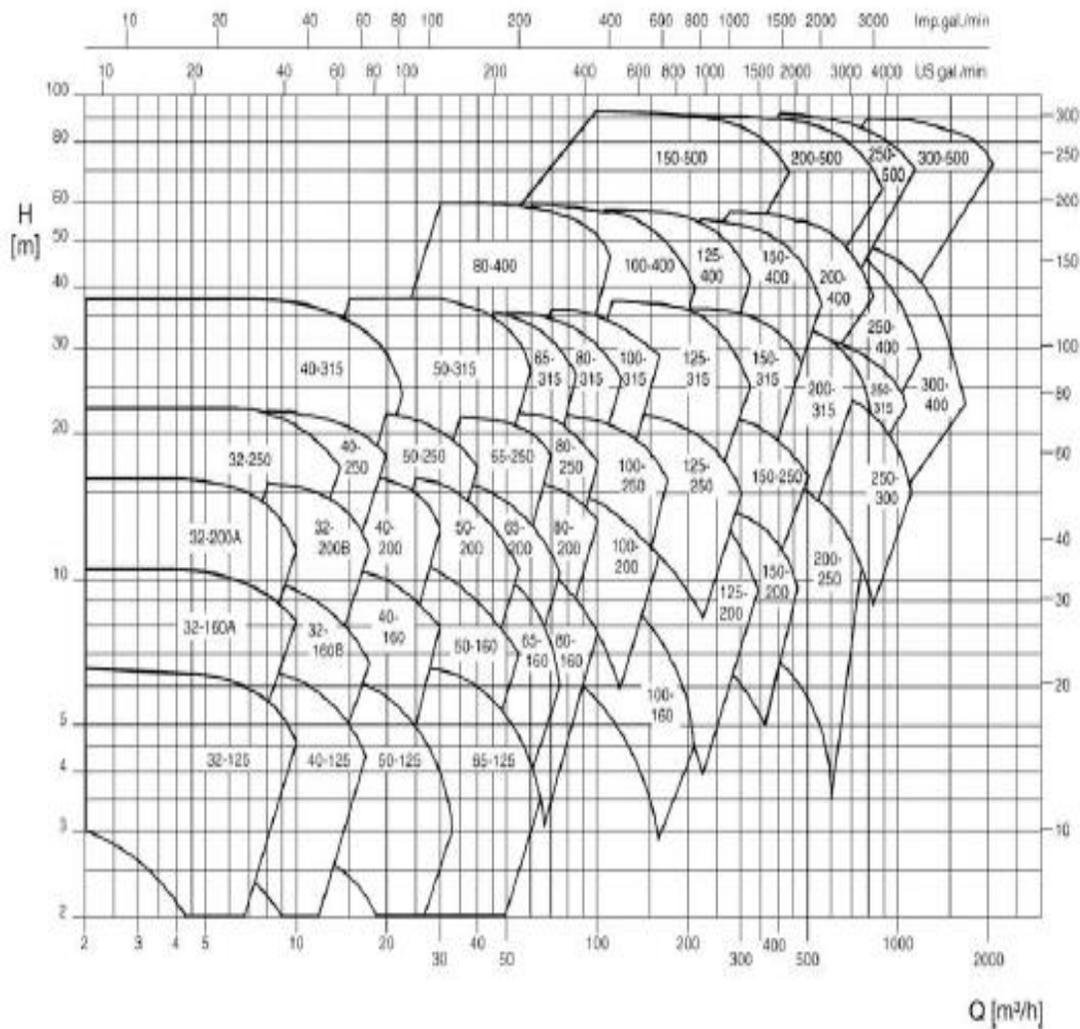
Diagrama flujo



Anexo 3: Catálogo de selección de la EBARA EMICA para el traslado del agua desde el tanque receptor hasta el tanque de almacenamiento para otros usos.

ELECTROBOMBA CENTRÍFUGA normalizada según EN 733 (DIN 24255) / **CENTRIFUGAL PUMP** according to EN 733 (DIN 24255)

CAMPO DE TRABAJO a 1.450 r.p.m. / SELECTION CHART at 1.450 r.p.m.





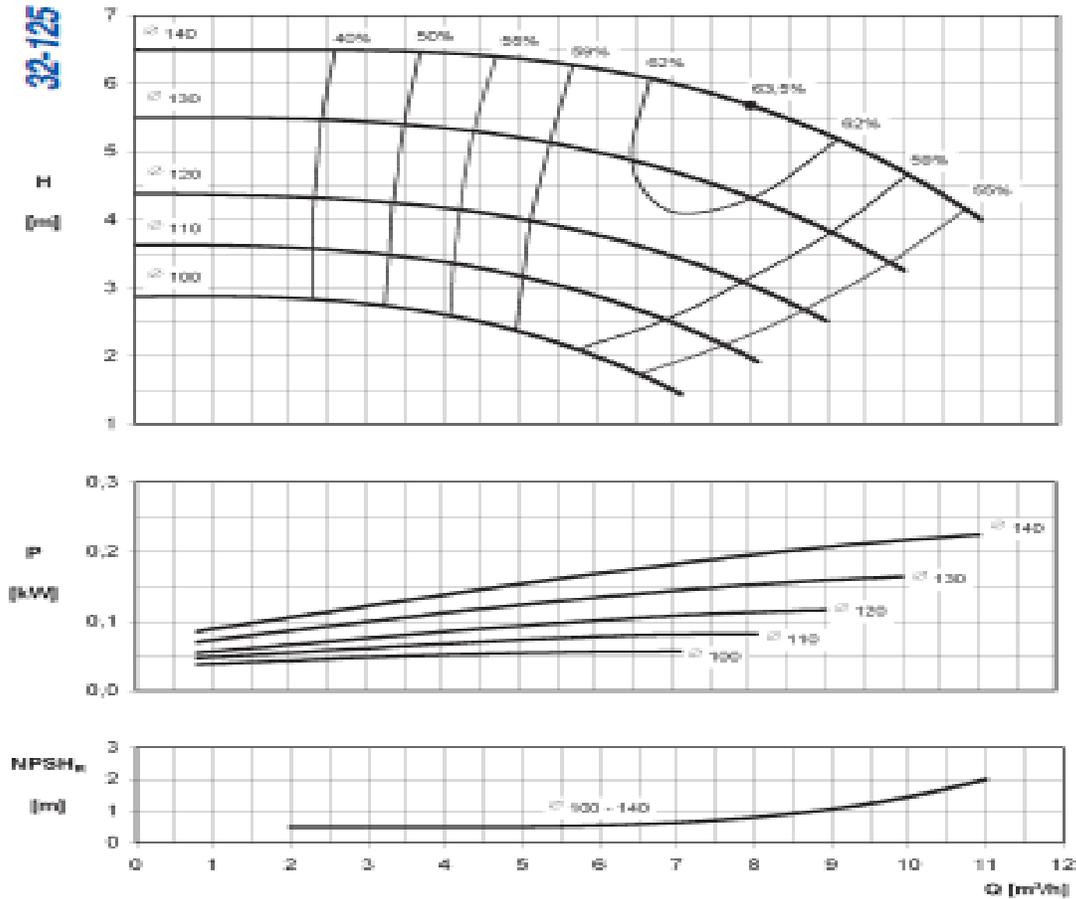
ENR (1.450 r.p.m.)

ELECTROBOMBA CENTRÍFUGA normalizada según EN 733 (DIN 24255) / CENTRIFUGAL PUMP according to EN 733 (DIN 24255)

CI

32-125

16 / 2)



Anexo 4. Resultados de la apreciación de los pre-calentadores IE-150A, IE-150B e IE-150C

Variable	Símbolo	Magnitud	U/M
Fluido por los tubos (frío)	Lodo		
Flujo	w	1720	kg/h
Temperatura inicial	t_1	25	°C
Temperatura final	t_2	54,3	°C
Temperatura promedio	t_c	39,65	°C
Capacidad calórica a presión constante	c_p	0,7	kcal/kg°C
Viscosidad a la temperatura promedio	μ	6,05	lb/(pie)(h)
Conductividad térmica a la temperatura promedio	k	0,104	Btu/h-(pie ²)(°F/pie)
Fluido por la coraza (caliente)	Condensado		
Flujo de condensado requerido	W	1200	kg/h
Temperatura inicial	t_1	90	°C
Temperatura final	t_2	30	°C
Temperatura promedio	t_c	60	°C
Capacidad calórica a presión constante	C_p	0,87	kcal/kg °C
Viscosidad del condensado a la temperatura promedio	μ_v	6,534	lb/pie.h
Intercambiador	Resultados		
Calor transferido	Q	72000	kcal/h
Media logarítmica de la diferencia de temperatura	LMTD	15,61	°C
Factor de diferencia de temperatura	F_t	1	-
Diferencia verdadera de temperatura entre las dos corrientes	Δt	15,61	°C
Área de flujo por tubo	a_t'	0,0033	pie ²
Área de flujo para el condensado	a_t	0,00018	pie ²
Velocidad másica del condensado	G_t	1 953944,44	lb/h.pie ²
Número de Reynolds	Re	21 186,57	-
Coeficiente de transferencia de calor del condensado	h_{io}	161,19	Btu/(h.pie ² .°F)
Temperatura de la pared del tubo	t_w	79,46	°C
Viscosidad del lodo a la temperatura de la pared	μ_w	0,104	cP
Viscosidad del condensado a la temperatura de la pared	μ_w	0,104	cP
Área de flujo para el lodo	a_s	0,00235	pie ²

Autor: Ing. Jayro Mesa Sotolongo

Velocidad másica del lodo	G_s	104 573,12	lb/h(pie ²)
Diámetro equivalente	D_e	0,113	plg
Número de Reynolds	Re	104131,20	-
Factor de transferencia de calor	j_H	250	-
Coefficiente de transferencia de calor del crudo	h_o	1216,35	Btu/h (pie ²)(°F)
Razón de viscosidad en la coraza	\varnothing_s	1	-
Coefficiente total limpio de transferencia de calor	U_C	142,3	Btu/(h.pie ² .°F)
Coefficiente total de diseño de transferencia de calor	U_D	36,8	Btu/(h.pie ² .°F)
Factor de obstrucción calculado	R_{dc}	0,02	h.pie ² .°F/Btu
Factor de obstrucción permitido	R_{dp}	0,0035	(h)(pie ²)(°F)/Btu
Factor de fricción para el lado de los tubos	f	0,00015	pie ² /plg ²
Razón de viscosidad en los tubos	\varnothing_t	1	-
Caída de presión en los tubos	ΔP_t	3,84	lbf/plg ²
Caída de presión de retorno o de regreso	ΔP_r	0,00031	lbf/plg ²
Caída de presión total en los tubos	ΔP_{tT}	3,84	lbf/plg ²
Caída de presión permitida para el lado de los tubos	ΔP_{tp}	10	lbf/plg ²
Factor de fricción para el lado de la coraza	f	0,00015	pie ² /plg ²
Número de cruces	$N+1$	20,16	-
Caída de presión para el lado de la coraza	ΔP_s	0,0567	lbf/plg ²
Caída de presión permitida para el lado de la coraza	ΔP_{sp}	10	lbf/plg ²