



Universidad de Matanzas  
Facultad de Ciencias Técnicas



# PROPUESTA DE UN DISEÑO DE PLANTA PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL IMPERMEABILIZANTE DE CUBIERTA MÁSTIQUE ASFÁLTICO CON POLÍMERO.

Tesis Presentada como Requisito Parcial  
para la Obtención del Título de  
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora

Autor: Ing. Diana Rosa Rodríguez Vega

Tutor: Dr.C. Carlos A. Echeverría Lage

Matanzas, 2017

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL**

Yo, Diana Rosa Rodríguez Vega, declaro que soy la única autora de la siguiente tesis, titulada Propuesta de un diseño de planta para el proceso de producción de impermeabilizante de cubierta Mástique Asfáltico con Polímero y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 11 de octubre de 2017.

Diana Rosa Rodríguez Vega

## **AGRADECIMIENTOS**

*A todas las personas que me apoyaron para cumplir esta meta.*

*A mis padres, mis hermanos, abuelos y a mi esposo por su ayuda incondicional.*

*A mi tutor Carlos Echeverría Lage que estimo y aprecio mucho, gracias por su dedicación en mi desarrollo investigativo.*

*A mis compañeros de trabajo de la Planta Piloto de la Universidad de Matanzas por brindarme su apoyo y colaboración en esta tarea.*

*A mis amigos y compañeros de clase en especial Roberto y Adielis, gracias por su amistad.*

*A mis profesores del Master y a todos aquellos en general que de alguna forma u otra forma aportaron al desarrollo de esta tesis en especial al profesor Mario Yll, gracias por su colaboración.*

*En fin a todos los que han contribuido con mi formación tanto personal como profesional.*

## **DEDICATORIA**

*Dedico esta tesis:*

*A mis padres Elia Rosa y José por apoyarme siempre y esforzarse tanto por mí,*

*A mi esposo Ernesto Miguel por su apoyo y cariño incondicional,*

*A mis abuelos Pedro, Tico y Vega por aconsejarme en mis estudios,*

*A mis hermanos Lester, José Luis y mi sobrina Keily,*

*A mis primos, primas, tías y tíos, a toda mi familia en general por ser tan especial y preocupada,*

*A los amigos y compañeros que compartieron conmigo estos años de estudio y sacrificio.*

## RESUMEN

El presente trabajo propone un diseño de planta para la producción de impermeabilizante de cubierta basado en Mástique Asfáltico con Polímero que permite satisfacer la demanda de dicho producto en la provincia de Matanzas. Para establecer el diseño de la planta se parte inicialmente de una instalación a escala planta piloto instalada en los laboratorios del Centro de Anticorrosivos y Tensoactivos (CEAT). Para el diseño de la planta que se propone a escala industrial se analizan aspectos relacionados con las técnicas de escalado de equipos en específico se utilizan técnicas de escalado geométrico para determinar las principales geometrías de equipos tales como el reactor y el mezclador. También se evalúan aspectos generales de la termodinámica del proceso y los fenómenos influyentes de transferencia de calor a lo largo del proceso productivo, con lo cual se determina la necesidad de un flujo de vapor para procesos de calefacción de aproximadamente 574kg/h, recomendando utilizar un equipo generador de vapor de tipo pirotubular. El presente estudio finaliza con la aplicación de técnicas que permiten evaluar indicadores económicos de vital importancia que analizan aspectos relacionados con la rentabilidad e inversión de la planta que aquí se propone. Dentro de los resultados de mayor relevancia en este aspecto podemos señalar que la propuesta de planta permite recuperar la inversión en 2,43 años, con un 41,18% de la tasa de Retorno, y el Valor Actual Neto alcanza un valor de \$ 4361657,94 por lo que se acepta la inversión de la planta propuesta por un valor de \$ 3781442,82 dado al cumplimiento de los indicadores de la eficiencia económica de la producción.

**Palabras claves:** diseño de planta, impermeabilizante de cubierta, escalado geométrico, balance energético, análisis económico.

## **ABSTRACT**

The present work proposes a plant design for the production of roof waterproofing based on Asphaltic Polymer Mastic that allows to satisfy the demand of this product in the province of Matanzas. In order to establish the design of the plant, an initial installation of a pilot plant installed in the laboratories of the Center for Anticorrosive and Surfactants (CEAT) is started. For the design of the plant that is proposed on an industrial scale, aspects related to equipment scaling techniques are specifically analyzed. Geometric scaling techniques are used to determine the main geometries of equipment such as the reactor and the mixer. General aspects of process thermodynamics and influential heat transfer phenomena are also evaluated throughout the production process, which determines the need for a steam flow for heating processes of approximately 574kg/h, recommending the use of a pyrotubular type steam generating equipment. This study ends with the application of techniques that allow the evaluation of vital economic indicators that analyze aspects related to the profitability and investment of the plant proposed here. Among the most relevant results in this area we can point out that the plant proposal allows to recover the investment in 2,43 years, with 41,18% of the rate of Return, and the Net Present Value reaches a value of \$ 4361657,94 for which the investment of the proposed plant is accepted for a value of \$ 3781442,82 due to compliance with the indicators of the economic efficiency of production.

**Keywords:** plant design, roof waterproofing, geometric scaling, energy balance, economic analysis.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo 1. Estado del Arte.....	5
1.1 Desarrollo de impermeabilizantes a escala mundial y en nuestro país. ....	5
1.2 Uso de materiales reciclados para la producción de impermeabilizantes. ....	8
1.2.1 Estado actual sobre la gestión de los desechos en nuestro país y el mundo. .	9
1.2.2 Empleo de materiales reciclados para la producción de impermeabilizantes. .....	11
1.3 Generalidades de los Mástiques Asfálticos con Polímero como impermeabilizantes. ....	12
1.3.1 Características de los componentes del Mástique Asfáltico con Polímero..	14
1.3.1.1 Características del Asfalto. ....	14
1.3.1.2 Características del polímero: polvo o viruta de goma. ....	16
1.3.1.3 Características del agente enlazante.....	17
1.4 Características del impermeabilizante Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma denominado DISTIN 405.....	17
1.5 Características de la instalación donde se produce el impermeabilizante Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma denominado DISTIN 405.....	19
1.5.1 Diagnóstico de la línea de producción del Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma en la etapa actual. ....	20
1.6 Aspectos generales para el diseño de plantas químicas. ....	21
1.7 Principios básicos para el proceso de escalado.....	22
1.7.1 Técnicas a emplear para el proceso de escalado.....	23

1.8 Aspectos sobre la termodinámica y los procesos de transferencia de calor. ....	27
1.9 Análisis económico de procesos. ....	29
1.9.1 Métodos para estimar el costo de inversión de un proyecto. ....	29
1.9.2 Indicadores de la eficiencia económica de la producción.....	30
1.10 Conclusiones parciales del capítulo .....	31
Capítulo 2 Materiales y Métodos .....	33
2.1 Determinación de la demanda y la capacidad de producción para el proceso de obtención del impermeabilizante de cubierta compuesto de MAP.....	33
2.2 Propuesta del diseño de planta para la producción de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma. ....	37
2.2.1 Descripción de la propuesta para el proceso de producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.....	38
2.2.2 Características de las materias primas para la elaboración del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.....	40
2.2.2.1 Residual de policosanol (CNS).....	40
2.2.2.2 Cemento Portland (P-350). ....	41
2.2.2.3 Aceite usado tipo SAE 15W40. ....	41
2.2.2.4 Cemento asfáltico.....	41
2.2.2.5 Polvo o viruta de goma proveniente de neumáticos desechados. ....	42
2.2.3 Cantidades de materiales para la propuesta de producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.....	42
2.3 Método empleado para el escalado del reactor y mezclador. ....	42



2.4 Balance de energía para el proceso de producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma. ....	48
2.4.1 Balance de energía en el reactor: .....	48
2.4.2 Balance de energía en el calentador de cemento asfáltico: .....	59
2.4.3 Balance de energía en el mezclador de jabón insoluble, cemento asfáltico y goma reciclada: .....	61
2.5 Metodología empleada para determinar la factibilidad económica de la planta propuesta. ....	62
2.5.1 Cálculo de la inversión o capital total invertido. ....	63
2.5.2 Cálculo de los indicadores económicos de la producción. ....	64
2.5.2.1 Determinación del Costo de Producción.....	64
2.5.2.2 Cálculo del Valor de la Producción. ....	67
2.5.2.3 Cálculo de la Ganancia. ....	68
2.5.2.4 Determinación de la Rentabilidad.....	68
2.5.2.6 Estructura de costo.....	68
2.5.2.7 Punto de equilibrio.....	69
2.5.2.8 Costo por peso: .....	69
2.5.3 Indicadores para evaluar la eficiencia económica de un proyecto.....	70
2.5.3.1 Retorno de la inversión. ....	70
2.5.3.2 Plazo de recuperación de la inversión.....	71
2.5.3.3 Cálculo del Valor Actual Neto (VAN). ....	71
2.5.3.4 Tasa Interna de Rentabilidad (TIR). ....	73
2.6 Conclusiones parciales del capítulo.....	74

Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	76
3.1 Resultados de la propuesta a escala industrial de la cantidad de materiales necesarios para satisfacer la demanda propuesta. ....	76
3.2 Resultados del escalado del reactor y el mezclador.....	77
3.2 Resultados del balance energético en el reactor, el calentador y el mezclador. ...	80
3.3 Propuesta del material de construcción, dimensionado de los equipos y equipos auxiliares de la planta.....	82
3.4 Resultados del análisis económico.....	83
3.5 Conclusiones parciales del capítulo .....	90
Conclusiones .....	91
Recomendaciones .....	93
Referencias Bibliográficas .....	94
Anexos .....	106

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 30 años los investigadores en la industria química han trabajado en la búsqueda de nuevas alternativas y dentro de ellas específicamente para el sector de la construcción a partir de la creación de nuevos productos que sean eficientes y a la vez económicamente factibles, además de lograr minimizar los daños al medio ambiente y esto se ha alcanzado a partir de la reutilización de materiales desechados o más bien conocidos como el empleo de materias primas recicladas para obtener productos de construcción (Echeverría *et al.*, 2015). Conjuntamente se trabaja también con el empleo de diversas herramientas para validar diversas propuestas a partir de la creación de nuevas capacidades de producción partiendo del análisis y desarrollo de diferentes productos de la construcción para ser materializado mediante un diseño de plantas.

Específicamente dentro de los materiales de la construcción que se están desarrollando actualmente a partir de materias primas recicladas, para los cuales se han obtenido resultados satisfactorios, tenemos los conocidos como impermeabilizantes para techo, cubierta o tejado. Siendo estos empleados para combatir la humedad por deterioro de la cubierta. Existen diversos tipos, usos y clasificaciones en dependencia de la estructura a impermeabilizar y al medio al cual será expuesto (Ramos *et al.*, 2014).

El surgimiento de la impermeabilización data de finales del siglo XIX como una necesidad y debido a su importancia para la industria de la construcción aún se mantiene en la actualidad donde en diversos sectores de esta rama a nivel internacional se están ejecutando varios trabajos según indica Alba *et al.*, (2013) los cuales han tenido gran interés por parte de los gobiernos, empresas, instituciones y la población en general para

proteger y conservar las cubiertas, así como en los otros tipos de aplicación (las áreas húmedas, las cimentaciones y muros exteriores) sin desechar aspectos tan imprescindibles como la valoración económica, que es fundamental, así como lo referido a la sustentabilidad, debido a que estos aspectos se mantuvieron por mucho tiempo alejados de las intervenciones constructivas (Alba y Cruz, 2012).

Los productos impermeabilizantes son sustancias de la industria de la construcción que protegen contra el paso del agua y/o la formación de humedad. Los materiales impermeabilizantes se aplican sobre todo en techos, paredes, azoteas, piscinas o cualquier superficie expuesta a la concentración de cantidades de agua. La principal función de los productos impermeabilizantes es preservar y prolongar la vida útil de cualquier edificación. Hay impermeabilizantes adecuados para cada situación, todo dependerá del lugar a proteger de la humedad. (Talib *et al.*, 2015.)

Específicamente en la impermeabilización para techos la Entidad de Ciencia e Innovación Tecnológica (ECTI), Unidad de Desarrollo e Innovación (UDI), denominada Centro de Anticorrosivos y Tensoactivos (CEAT), de la Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos” (UMCC), ha desarrollado un producto en fase de Innovación Tecnológica (IT), a escala de planta piloto a partir de materias primas recicladas, que da respuesta a un Proyecto Internacional (PI) y Proyecto Nacional (PN) con Términos de Referencia (TR), denominado: “Impermeabilización de cubiertas de viviendas elaborada con material reciclado para familias vulnerables del municipio de Calimete”. Estos proyectos responden además al Programa Nacional de Materiales para la Vivienda (PNMV) del Ministerio de la Construcción (MICONS), y plantean en una segunda etapa

de IT, con los resultados de la presente investigación, la creación de capacidades productivas en regiones del país.

El impermeabilizante compuesto por una Matriz Asfáltica modificada con Polímero (MAP), está constituido por dos componentes esenciales, la matriz (cemento asfáltico) y el refuerzo (polímero: polvo y virutas de goma de neumáticos), unidos a través de un agente enlazante (jabón). La unión del componente asfáltico y el jabón se denomina Mástique Asfáltico (MA). Por su composición se identifica como un recubrimiento de bajo costo y de un mínimo de impacto ambiental por el empleo del reciclado (Echeverría *et al.*, 2008 y Echeverría *et al.*, 2011).

**El problema científico que se aborda en este trabajo consiste** en que no se dispone de una planta para la elaboración del impermeabilizante Mástique Asfáltico con Polímero en la provincia de Matanzas para darle solución a los problemas de impermeabilización que presentan las edificaciones en esta provincia.

Analizando el problema anterior, **la hipótesis del trabajo es:** Si se realiza una propuesta de diseño de planta para la producción a escala industrial del impermeabilizante para cubierta denominado Mástique Asfáltico con Polímero se podrá dar respuesta a los problemas de impermeabilización que presentan las edificaciones en la provincia de Matanzas.

A partir de la consideración de la hipótesis anterior, el presente trabajo se orienta hacia el cumplimiento del siguiente **objetivo:**

**Objetivo General:** Desarrollar una propuesta de diseño de planta para la producción a escala industrial del impermeabilizante de cubierta denominado Mástique Asfáltico con Polímero para satisfacer las necesidades de impermeabilización de las edificaciones en la provincia de Matanzas.

En vista a cumplimentar el objetivo anterior, se han trazado las siguientes **tareas científicas-técnicas:**

1. Llevar a cabo un análisis bibliográfico que permita conocer el estado actual de la temática abordada en la investigación.
2. Propuesta de un esquema a escala industrial para la producción de Mástique Asfáltico con Polímero.
3. Desarrollar el escalado del equipo principal de la planta piloto hacia la escala industrial.
4. Realizar un análisis energético de la planta propuesta para la producción de Mástique Asfáltico con Polímero.
5. Realizar un análisis económico de la propuesta de planta para la producción de Mástique Asfáltico con Polímero.

## **CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE**

El objetivo de este capítulo, es realizar un análisis de la bibliografía que permita conocer el estado actual de la temática abordada en la investigación, con el propósito de analizar lo referido al desarrollo de los impermeabilizantes a nivel internacional y en nuestro país, el uso de materiales reciclados para su producción, sus características, así como el estudio del esquema principal de la Planta Piloto donde se produce actualmente el impermeabilizante Mástique Asfáltico con Polímero. Se analizan los aspectos generales para la realización de diseño de plantas, los métodos existentes para el escalado de equipos, los aspectos generales de la termodinámica y los procesos de transferencia de calor, además de las técnicas existentes para el desarrollo de un análisis económico en diseños de plantas.

### **1.1 Desarrollo de impermeabilizantes a escala mundial y en nuestro país.**

Los procesos de impermeabilización cobran cada día más importancia en una obra constructiva. Las tecnologías se han desarrollado prolíficamente, por lo que la oferta de productos en esta área es amplia y gracias a su masificación está presente en todas las áreas y estructuras: obras civiles de edificación y proyectos especiales (Pradenas y Del Campo, 2017). A escala internacional según indica Fuentes, (2015) se han desarrollado diversos tipos de impermeabilizantes para cubierta como las membranas asfálticas, de poliuretano o acrílicos en superficies planas, el acritón impermeable entre otros, y estas varían de acuerdo al tipo de cubierta a trabajar. Según los avances en las investigaciones, aún falta mucho por desarrollar en el área de los impermeabilizantes, aunque se espera que en pocos años nuevos materiales propiciarán mejores resultados en el sellado de las

superficies y en la protección de las azoteas, porque hasta el momento los sistemas de monocapa y los de prefabricados solucionan los problemas como máximo hasta por 15 años (Alba y Cruz, 2012). Actualmente existen dos grandes áreas de impermeabilización; donde una es la impermeabilización en masa, que es la que se agrega a los hormigones y que se denomina comúnmente como aditivos hidrófugos, que disminuyen el riesgo de permeabilidad del material, para que la vivienda tenga la menor humedad posible en su estructura y paralelamente, también están los impermeabilizantes de contacto, que se aplican cuando la obra gruesa ya está lista. De ese tipo hay disponible una gran variedad y se han desarrollado rápidamente. En muchas obras se complementan los dos tipos de impermeabilizantes, es decir, se agregan en el hormigón y después sobre su superficie (Pradenas y Del Campo, 2017). Además existen compañías especializadas en la fabricación de productos químicos para la construcción, como la denominada MAPEI creada en 1937, siendo una corporación global de capital privado con su sede en Milán, Italia, la cual incluye 70 plantas en 32 países y dentro de la gama de productos que desarrollan se encuentran los impermeabilizantes, (MAPEI, 2017). Dentro de los impermeabilizantes de cubierta que se han desarrollado se encuentran los impermeabilizantes asfálticos, los cuales tienen la ventaja de adaptarse a cualquier superficie expuesta a la intemperie. Existen de varios tipos: ecológicos y resistentes a los rayos ultravioleta y se puede aplicar solo o reforzado usando membranas de poliéster (Alba y Cruz, 2012). Además se han desarrollado los impermeabilizantes a partir de materias primas recicladas los cuales brindan resultados satisfactorios y a su vez colabora con el medio ambiente (Palma, 2014). Ejemplo de ello incluye el caucho en mezclas asfálticas en frío y en caliente, proveniente de la molienda de neumáticos en desuso tanto



para la pavimentación como la impermeabilización de cubierta (Cuattrocchio *et al.*, 2006).

En nuestro país específicamente en la provincia de Matanzas uno de los productos que se han utilizado como sistemas impermeabilizantes se encuentran el enrajonado y la soldadura a partir de la implementación de las losas de cerámica roja encargadas de la resistencia superficial y terminación de la cubierta, conocido como único sistema de características rígidas el cual es muy eficaz desde el punto de vista de garantía del impermeabilizante así como económicamente factible, pero desde hace varios años no utilizan estos sistemas dado que las materias primas que se empleaban para su producción no contaban con la calidad requerida; por lo tanto surge como nuevo sistema impermeabilizante las denominadas mantas asfálticas que se forma solapando entre sí, transversal y longitudinalmente, los rollos extendidos de láminas asfálticas prefabricadas, cubriendo la superficie de la cubierta. Esta membrana puede estar constituida por una sola lámina, por dos o más láminas (Ramos *et al.*, 2015 y Alba y Cruz, 2012). El sistema impermeable cementoso D-10 es otro producto empleado, compuesto de agregados seleccionados aditivos y cemento; además se utilizan también los impermeabilizantes poliméricos líquidos (conocidos vulgarmente como pinturas impermeables) constituidos por láminas aplicadas en el lugar cuya base impermeabilizante es de resinas sintéticas en emulsión acuosa o solvente, que una vez secas forman una película flexible impermeable. (Cruz, 2010 y Alba y Cruz, 2012).

En la actualidad en el país se realizan producciones de mantas asfálticas con asfalto oxidado y láminas importadas en la Fábrica PERDURIT en El Cano La Habana, que no satisfacen las demandas crecientes. Además, las limitadas elaboraciones que se acometen

en la Planta Piloto de la Universidad de Matanzas con la Marca Estatal DISTIN las cuales se caracterizan por emplear materias primas recicladas (García, 2013) no lograr satisfacerla demanda actual. El impermeabilizante puede estar constituido por un Mástique Asfáltico (MA), formado por el componente asfáltico y jabón ó un Mástique Asfáltico con Polímero (MAP).

En nuestro país se trazaron los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para garantizar un desarrollo económico, social y la disminución de importaciones y se encuentran plasmados lineamientos como el 218, 233 y 293 que se relacionan con la obtención y desarrollo de materiales para la construcción que tengan un impacto ambiental y social positivo; acreditando el incremento de la producción de impermeabilizantes de cubierta lo que propicia el desarrollo y aseguramiento de los programas inversionistas priorizados en el país para la creación de nuevas capacidades de producción.

## **1.2 Uso de materiales reciclados para la producción de impermeabilizantes.**

El empleo de materiales reciclados para la producción de impermeabilizante tiene como principal objetivo disminuir la acumulación de sustancias y materiales al medio ambiente reduciendo la contaminación del entorno y a su vez los daños a la capa de ozono. A continuación se aborda sobre la gestión de los desechos en nuestro país y el mundo y varios de los materiales reciclados que se utilizan para la producción de impermeabilizantes.

### **1.2.1 Estado actual sobre la gestión de los desechos en nuestro país y el mundo.**

Específicamente en Estados Unidos y Europa existe una clara preocupación con la gestión de los desechos, y para ello se han creado normativas y leyes para crear consciencia sobre el reciclaje y así obtener beneficios tanto económicos como medioambientales según comentan Castro, (2007) y Aguado, (2010).

Un ejemplo de estos desechos son los neumáticos usados, dado que es un material no biodegradable y en el planeta se generan anualmente más de 600 millones de estos residuos constituyendo actualmente uno de los problemas medioambientales más graves de los últimos años según expone Kubicky *et al.* (2002) y Cahill, (2002). Por otro lado Shu y Huang, (2014) señala que solamente en Estados Unidos, se desechan al año alrededor de 50 millones de neumáticos, y se estima que existen entre 2 a 3 billones de estos desechos acumulados en dicha nación. Aproximadamente, 10% de estos son incinerados, cerca del 4% son exportados a otros países para ser incinerados, otro 2% es usado en caucho asfáltico y solamente el 2% es reciclado en otros productos. Otros autores como Castro, (2007) concuerda con lo anteriormente expuesto añadiendo que el almacenamiento genera la proliferación de roedores, insectos y otros animales dañinos que constituye un problema de sanidad.

En nuestro país, no se conocen intentos serios por reciclar o recuperar industrialmente neumáticos en cantidades significativas. La forma más común de eliminación consiste en depositarlos en vertederos, sin embargo está provocando una saturación de estos (Castro, 2007). Las investigaciones y desarrollos de nuevas tecnologías para el reciclaje de los neumáticos usados, según plantea Echeverría *et al.*, (2011) constituyen un tema de

actualidad objeto de atención por el CITMA, la Unión de Empresas de la Goma, la Unión de Empresas de Recuperación de Materias Primas, entre otras instituciones que se vinculan a esta problemática.

Otro ejemplo es el cemento asfáltico que es un residuo de la refinación del petróleo, el cual es usado para la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentación, impermeabilización entre otros, pero no se considera como un residual altamente peligroso para el medio ambiente dado que tiene una reutilización directa como se menciona anteriormente (Salamanca, 2007).

También dentro de los residuos existentes se encuentra los aceites lubricantes usados provenientes de instalaciones industriales, vehículos de transporte entre otros, los cuales se consideran también como uno de los más peligrosos contaminantes que existen (Soto *et al.*, 2014).

Algunas empresas como SIGAUS gestiona el aceite industrial usado en España, evitando cada año la contaminación de cerca de 120000 toneladas de este residuo procedente de talleres de automoción e instalaciones industriales. Alrededor del 70% de estos aceites usados son tratados para extraer de ellos nuevas bases lubricantes, mientras que el 30% restante es aprovechado como combustible industrial. Además en la legislación europea existen métodos de regeneración de estos aceites lubricantes constituyendo un ahorro considerable de materias primas para la producción de nuevos aceites industriales (Guerin, 2008). Actualmente según plantea Unissa y Hassanpour, (2017) los aceites lubricantes usados se pueden reciclar para producir otros materiales como betún asfáltico

que se utiliza para producir telas impermeabilizantes, pinturas, tintas y fertilizantes o en el asfaltado de carreteras.

En nuestro país los aceites lubricantes usados se consideran desechos peligrosos, según el convenio de Basilea, de 1989, del cual Cuba es signataria. En la provincia de Sancti Spíritus se impulsa la recogida de esos aceites, para mezclarlos con el crudo cubano en la fábrica de cemento Siguaney, medida que puede tener un gran impacto económico y medioambiental (Jiménez A., 2010). Por otro lado actualmente se estima que se generan alrededor de 18-20 MT/año de aceites lubricantes usados, provenientes de diversos sectores de la economía nacional, y no se dispone de tecnologías para su pretratamiento y reutilización eficiente del potencial energético que poseen, lo que significa una inadecuada gestión tecnológica y ambiental considerándose como un problema potencial para el medio ambiente; además la forma de eliminación de este residuo es la combustión que provoca grandes problemas de contaminación ambiental por la emanación de gases de combustión y solo es reutilizado un porcentaje poco significativo, donde actualmente se trabaja en valorar las características de este desecho para su uso como combustible, único destino final posible en estos momentos (Soto *et al.*, 2014), y la Resolución 136 del 2009, del CITMA, que regula el manejo integral de desechos peligrosos, establece que las entidades tienen que recoger sus aceites usados y preservarlos adecuadamente.

### **1.2.2 Empleo de materiales reciclados para la producción de impermeabilizantes.**

Algunos estudios han demostrado para el sector de la construcción, específicamente para la producción de impermeabilizantes, el empleo de diversos materiales reciclados que por

sus propiedades brindan excelentes resultados, un ejemplo de ello son los neumáticos usados (Echeverría *et al.*, 2011).

Según plantea Hernández *et al.*, (2002) y Aguado, (2010) los estudios sobre el aprovechamiento de los neumáticos fuera de uso, han estado orientados hacia la obtención de energía, así como Shu y Huang, (2014) añaden además que son aprovechados los neumáticos enteros como barreras de choque, parachoques y de protección para los arrecifes, entre otras aplicaciones; pero también Cahill *et al.*, (2002) resalta que una de las aplicaciones actuales de reciclar los neumáticos de desecho en nuevos proyectos ingeniería es principalmente para ser utilizados como rellenos ligeros para modificar mezclas asfálticas para recubrimientos. Actualmente en Colombia se tienen algunas plantas de procesamiento de llanta, para su reutilización en la industria como rellenos para impermeabilizantes, entre otras aplicaciones (Ramírez, 2011).

Algunas patentes como Laurence (2005) e investigaciones realizadas por Pérez *et al.*, (2006) plantean que el caucho triturado obtenido a partir de neumáticos de vehículos reciclados se ha mezclado con asfalto para formar varios materiales compuestos conocidos generalmente como "asfalto modificado con caucho" o "cemento asfáltico de caucho" para lo cual es muy efectivo entre otras aplicaciones para la impermeabilización.

### **1.3 Generalidades de los Mástiques Asfálticos con Polímero como impermeabilizantes.**

Los mástiques asfálticos con polímero se caracterizan por ser materiales compuestos constituidos básicamente por matrices y rellenos. La matriz es, en esencia, el elemento aglomerante y sus propiedades determinan la resistencia a la fatiga, a los efectos del

medio al que será expuesto y a la temperatura de trabajo; por lo que uno de los materiales más utilizados como matriz es el asfalto (Sagaró *et al.* 2004 y Rodríguez *et al.* 2006). Por otro lado los rellenos poseen altos valores de dureza, resistencia y módulo de elasticidad y a su vez ayudan a incrementar estas propiedades en los materiales compuestos; por lo tanto uno de los materiales que se utilizan como rellenos en los mástiques asfálticos son los polímeros (Roca, 2005). A partir de una combinación adecuada de la matriz y el relleno se pueden originar materiales compuestos con excelentes propiedades debido a las características que presentan estos dos materiales por separado.

Algunos autores como Múnera, *et al.*, (2010) plantean que mundialmente los polímeros tienen diversas aplicaciones y dentro de ellas son empleados como modificadores del asfalto; otros investigadores como Reyes, *et al.* (2006) y Tonda, (2006) señalan que además de aumentar la viscosidad del asfalto le brindan mejores propiedades mecánicas como mayor resistencia a deformaciones permanentes y en especial su recuperación elástica.

Para la modificación de los asfaltos, los polímeros que más se utilizan son los elastómeros con el objetivo de lograr una mayor elasticidad al asfalto; además Polacco *et al.*, (2015) plantean que en la actualidad existe en el mercado internacional un gran número de modificadores para el asfalto a base de polímeros y un ejemplo de estos modificadores pueden ser SBR (caucho-estireno-butadieno). (Ramírez, 2011 y Travieso, 2015).

Autores como Hernández *et al.*, (2002) han realizado trabajos de investigación en el campo de los asfaltos modificados con polvo de neumáticos reciclados aplicados en la

elaboración de recubrimientos para la construcción, al igual que Hernández *et al.*, (2003) y Pérez *et al.*, (2006) desarrollaron estudios sobre la efectividad de las mezclas asfálticas modificados con polvo de neumáticos, para lo cual se obtuvieron excelentes resultados como impermeabilizantes.

La patente de aplicación según plantea Aoyama, *et al.* (1997) reivindica una composición de asfalto modificado con goma, que puede ser utilizada a temperatura normal y por proyección y dentro de sus aplicaciones se encuentra la protección a la humedad y al óxido; además se emplea como relleno en edificaciones y estructuras formando un recubrimiento protector. Igualmente las patentes propuestas por Buras *et al.* (2004) y Partanen, (2005) reivindican composiciones asfálticas modificadas con polímeros tal como el caucho que mejora sus propiedades reológicas de modo que el producto satisface los límites especificados en las temperaturas requeridas.

### **1.3.1 Características de los componentes del Mástique Asfáltico con Polímero.**

De forma general el Mástique Asfáltico con Polímero está compuesto por dos materiales principales el asfalto y el polímero, (específicamente el polvo o viruta de goma) y en dependencia de su aplicación y a las condiciones que será expuesto se emplean diferentes agentes enlazantes.

#### **1.3.1.1 Características del Asfalto.**

Según Mercado *et al.*, (2008) y Perry y Green, (2008) los asfaltos desde el punto de vista de composición química, son mezclas complejas de hidrocarburos de alto peso molecular,



con una notable proporción de heteroátomos (Oxígeno, Azufre, Nitrógeno) y cierta cantidad de metales, tales como Vanadio y Níquel. Otros autores como Salamanca, (2007) y Gamboa, (2012) describen al asfalto como una sustancia negra, pegajosa, que varía ampliamente en consistencia con la temperatura, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. El uso más frecuente de los asfaltos está en el revestimiento de carreteras, impermeabilización de estructuras, como depósitos, techos o tejados, y en la fabricación de baldosas, pisos y tejas (Travieso, 2015).

Según Wulf, (2008), dentro de las características más importantes que posee el asfalto son su consistencia refiriéndose a la dureza del material, la cual depende de la temperatura. También se encuentra la durabilidad del material que se caracteriza por la capacidad de mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de agentes envejecedores. Otra propiedad es la pureza del producto que se corresponde con su composición química y el contenido de impurezas que posee.

El asfalto se obtiene a partir de la refinación del crudo de petróleo o mezclas de crudos de petróleo. Para ello es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes y se puede clasificar en tres tipos: cemento asfáltico, asfalto diluido (o cortado) y/o asfalto emulsificado.

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes: viscosidad, viscosidad después de envejecimiento, y penetración. Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con distintos rangos de dureza o consistencia, y de acuerdo a esto se escoge uno u otro en función de su aplicación. Para ello se puede observar en el anexo 1 los diferentes tipos de clasificación del cemento asfáltico (Salamanca, 2007).

Según plantea Salamanca, (2007) el Cemento Asfáltico se considera un excelente material impermeabilizante debido a que no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales; catalogándose como un material resistente a muchos tipos de agentes químicos agresivos.

### **1.3.1.2 Características del polímero: polvo o viruta de goma.**

El polvo o viruta de goma para la elaboración de Mástiques Asfálticos con Polímero como se expone anteriormente proviene de los neumáticos usados y se compone mayoritariamente de caucho, aunque llevan otros aditivos en diferentes porcentajes. Según plantea Agnus, (1999) y Botasso *et al.*, (2008) el caucho se puede obtener de forma natural y sintética, mientras que Hervás, (2006) y Mazzotta *et al.*, (2017) señalan que el caucho presenta diferentes características como excelente elasticidad, resistencia al agrietamiento, impide acumulación de agua, incrementa adherencia, bajo nivel de ruido entre otras (Perry y Green, 2008).

El caucho procedente de los neumáticos usados según menciona Echeverría *et al.*, (2015) es muy utilizado como parte del material ligante o capa selladora del asfalto para la elaboración de recubrimientos como los impermeabilizantes de cubierta. Además en el Proyecto Nacional (PN) aprobado se precisa como fuente actual de la viruta y polvo de goma proviene del residual de las plantas recapadoras del país, que los contiene, y que alcanza cifras de aproximadamente 500 toneladas anuales (Echeverría *et al.*, 2017).

### **1.3.1.3 Características del agente enlazante.**

Dentro de los agentes enlazantes más utilizados se encuentran los llamados jabones según plantea González (1995) y García, (2013), y este se caracteriza por ser una sal organometálica que se produce en las reacciones de saponificación. Los jabones empleados en las mástiques son generalmente el resultado de la saponificación de un sebo (ácido graso superior) con una sustancia alcalina. El álcali que se emplea en la saponificación determina las características del jabón y constituye lo que se denomina base del jabón. La producción de los jabones se realiza con bases de: calcio, sodio, aluminio, bario, litio, cinc y plomo. Se fabrican también jabones con bases compuestas, o sea, de jabones mixtos con más de un componente alcalino.

### **1.4 Características del impermeabilizante Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma denominado DISTIN 405.**

A partir de diversas investigaciones realizadas en el Centro de Anticorrosivos y Tensoactivos (CEAT) de la Universidad de Matanzas se han desarrollado tecnologías para la obtención de mástiques asfálticos desde el año 1994, período en el cual se crea la primera patente de este producto, aunque esta patente no incluía el polvo de goma como materia prima (García, 2013). Desde hace algunos años se trabaja en la actualización de la misma a partir del desarrollo de un nuevo impermeabilizante conocido como DISTIN 405, identificado en el presente trabajo como Mástique Asfáltico con Polímero (MAP), que presenta la característica de ser un producto de producción nacional a partir de materiales reciclados.

Según Echeverría *et al.*, (2011) este impermeabilizante tiene la característica de ser un material compuesto de matriz asfáltica modificada con polímero (MAP) compuesto por la matriz (cemento asfáltico) y el refuerzo o relleno (polímero: polvo o virutas de goma de neumáticos), que a partir de diversos estudios realizados por investigadores del CEAT se decide emplear este material polimérico; unidos a través de un agente enlazante (jabón insoluble) sobrebasificado. Primeramente se obtuvo a nivel de laboratorio y posteriormente a escala de planta piloto en las instalaciones del CEAT (Echeverría *et al.*, 2005, Echeverría *et al.*, 2006 y Echeverría *et al.*, 2007). Para este caso los componentes que se emplean para obtener el jabón son el residual de policosanol el cual contiene jabones de potasio, que reacciona con el calcio y magnesio presentes en una disolución de cemento hidrolizado y se emplea aceite lubricante usado como emulsionante para formar el jabón insoluble.

Este impermeabilizante expresa Echeverría *et al.*, (2015) y Echeverría *et al.*, (2017) ha sido evaluado por diferentes entidades que certifican la calidad y efectividad del material entre los que se pueden citar el Laboratorio de Ensayos de Corrosión (LECO), el Centro de Certificación de Productos Tropicalizados (LABET); además se han realizado análisis en los laboratorios de Ingenierías de Corrosión y Materiales (ENCOMAT) de la Universidad de Vigo, España con el objetivo de obtener las características físico-químicas del producto y actualmente se encuentra como parte de un Proyecto Internacional con dicha universidad española.

### **1.5 Características de la instalación donde se produce el impermeabilizante Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma denominado DISTIN 405.**

Actualmente este producto se produce a escala de planta piloto lo que dificulta satisfacer la demanda existente. Esta instalación cuenta para la producción de este material con un equipo principal y la descripción del proceso productivo se muestra a continuación:

Primeramente todas las materias primas tienen que pasar previamente por el ensayo de control de calidad, que realiza el laboratorio y donde se comprueban los parámetros principales de cada producto. Las materias primas que se utilizan son: el residual de policosanol, el cemento tipo Portland P-350, agua, el aceite lubricante usado tipo 15W40, el cemento asfáltico y el polvo o viruta de goma.

El proceso comienza en un reactor enchaquetado con agitación donde se obtiene el jabón insoluble a partir de la reacción de saponificación entre el residual de policosanol y el cemento hidrolizado emulsionados en aceite. Este proceso se realiza con calentamiento con una temperatura y presión establecida durante un tiempo determinado. Concluido este tiempo se procede a una descompresión para lograr una disminución de la temperatura.

Se descarga la mitad del producto y se añade el cemento asfáltico al reactor proveniente de un equipo de fundición manual, manteniendo la agitación con calentamiento para garantizar una homogenización completa de la mezcla a presión atmosférica, obteniéndose el Mástique Asfáltico sin polímero de goma. Posteriormente se añade el polvo de goma al reactor con las mismas condiciones de trabajo y se obtiene el Mástique Asfáltico con polímero de goma, luego se procede a la descarga del reactor. Se realiza

nuevamente este proceso para la otra mitad de producto (jabón insoluble) que había sido descargado en el reactor y se procede a realizar el mismo procedimiento para obtener una producción de Mástique Asfáltico con Polímero (MAP).

### **1.5.1 Diagnóstico de la línea de producción del Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma en la etapa actual.**

Una vez realizada la descripción se puede constatar que para la producción de dicho impermeabilizante la planta piloto no cuenta con los equipos necesarios para el desarrollo línea de producción de Mástique Asfáltico con Polímero debido a que la elaboración de este producto se lleva a cabo en el reactor que además actualmente se emplea para la producción de otros productos (dígase grasas de conservación, recubrimientos fosfáticos, cera abrillantadora, aditivos para la construcción y Mástiques Asfálticos) esto trae como consecuencia que disminuyan los volúmenes de producción al no poder utilizar la capacidad instalada a tiempo completo, dado que actualmente solo se realiza la producción de Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma una vez por semana.

A partir de otras investigaciones realizadas por García (2013) y Álvarez, (2015) realizaron diversas propuestas y modificaciones para la línea de obtención de recubrimientos a partir de un análisis del diagrama As-Is. En estas investigaciones se propone la preparación del cemento hidrolizado en un tanque mezclador; esto permite la reducción del tiempo de operación y una mayor calidad del proceso, ya que se dosifica una suspensión más homogénea, dado que actualmente se realiza este proceso de forma manual lo cual demora un tiempo considerable.

El otro paso del proceso que introduce las mayores pérdidas de tiempo, es la descarga y almacenaje del 50% del reactor, y se propone el diseño de un reactor con las mismas características que presenta actualmente el instalado en la planta piloto para la obtención solamente del jabón insoluble y el diseño de un mezclador enchaquetado para el mezclado del jabón insoluble con el cemento asfáltico y el polvo o viruta de goma, así como proponer el diseño de un tanque para el calentamiento de cemento asfáltico.

### **1.6 Aspectos generales para el diseño de plantas químicas.**

El diseño de procesos o de plantas químicas es uno de los campos más apasionantes y complejos dentro de la ingeniería química, y es el corazón del desarrollo de proyectos de ingeniería relacionados con la construcción de nuevas plantas de procesamiento. (Barón y Zapata, 2012).

Autores como Jávita, (2012) plantea que para el diseño de plantas primeramente se analiza el problema primitivo; es decir el producto en cuestión que se va a obtener mediante la creación de una nueva capacidad de producción y/o se valora las posibles alternativas. Posteriormente se analiza el diagrama de flujo correspondiente al producto y se realizan los cálculos de balance de masa y energía así como de diseño de los equipos y operaciones esenciales del proceso seleccionados. Por último se realiza el análisis económico de la producción y la inversión para la validación del diseño de planta desde el punto de vista de factibilidad económica (Peters, y Timmerhaus, 1991 y Ulrich, 1997). Para obtener un diseño de planta efectivo se emplea un simulador de procesos para evitar errores humanos así como para obtener resultados eficaces que permitan su análisis para

materializar el proceso y que opere de forma eficiente; además es necesario tener en cuenta la evaluación de los riesgos industriales y el impacto ambiental del proceso.

### **1.7 Principios básicos para el proceso de escalado.**

En la literatura reportada por Bisio y Kabel, (1985) se define el escalado como la “operación y puesta en marcha de manera exitosa de una unidad de tamaño comercial cuyo diseño y procedimientos de operación se basan, en parte, en experimentación y demostración a una escala más pequeña de operación”. Por su parte, en la definición de Kossen, (1996) plantea que: “El escalado es el diseño y construcción de una unidad o conjunto de unidades de procesamiento a gran escala, en la cual se toman como base los cálculos y experimentos a pequeña escala” lo cual indica que no basta solamente con un aumento de las dimensiones de un equipo del proceso sino es necesario tener en cuenta una serie de factores que pueden influir en el mismo.

El escalado es una tarea indispensable en toda actividad industrial, ninguna planta de producción puede ser construida sin cálculos, estudios previos y demostraciones en condiciones diferentes a la escala comercial. Esta tarea involucra actividades de diversas áreas del conocimiento, como el mercadeo, el diseño de producto, la evaluación de producto, el diseño de la planta y la construcción de la misma. (Ruíz, 2009)

A pesar de los métodos existentes usados tradicionalmente para realizar el escalado de un proceso químico, hasta ahora no se ha encontrado una metodología que permita aumentar la escala de producción desde el laboratorio a planta piloto o a escala comercial en forma directa, eficiente y eficaz: debido al desconocimiento de la fenomenología de los



procesos, por lo que ha sido necesario realizar experimentaciones con aumentos graduales de escala (Margarites y Zajic, 1978).

Otros autores como Ruíz y Álvarez, (2011) plantean que generalmente, el escalado de procesos se ha realizado según la perspectiva del análisis dimensional, la semejanza geométrica, las relaciones empíricas a partir de un conjunto de datos, los métodos experimentales y, por último, los modelos con el apoyo de las relaciones empíricas.

Algunos autores como Selman (1983) y Ruíz, (2009) concuerdan que el escalado se fundamenta en el llamado principio de semejanza o similitud. Este principio se refiere a las relaciones entre sistemas físicos de tamaños diferentes y es esencial para el cambio de escala de procesos químicos y bioquímicos. Además según demuestra Johnstone y Thring (1957) de manera general, los objetos y sistemas físicos poseen tres características: tamaño, forma y composición. Éstas son independientes, puesto que, para un proceso específico, puede cambiar el tamaño y mantenerse la forma y la composición.

### **1.7.1 Técnicas a emplear para el proceso de escalado.**

Para cumplir con el objetivo del escalado según indica González, (2000) se necesita aplicar un conjunto de técnicas, metodologías y procedimientos que permitan transferir a la escala industrial, los datos obtenidos en los experimentos a escala reducida. Dentro de las técnicas que se utilizan para el escalado se encuentra la Teoría de los Modelos y dentro de los conceptos fundamentales de esta teoría se encuentra los denominados modelo y prototipo. El modelo es un dispositivo o medio que está concebido de tal manera que puede ser usado para predecir el rendimiento de un prototipo. El prototipo, es

el sistema físico a escala completa, que va a ser modelado (González, 2000 y Domínguez, 2009). El prototipo no tiene que existir necesariamente antes que el modelo. Lo que determina es la relación que existe entre las unidades de pequeña y gran escala, con independencia de cuál exista antes en el tiempo.

Para la realización de ese proceso se utilizan fundamentalmente los métodos basados en el Principio de Semejanza y la Modelación Matemática, o una combinación de ambos (Brizuela, 1987; González, 2000; Rosabal y Garcell, 2006 y Domínguez, 2009).

El Principio de Semejanza se basa en que los objetos materiales se caracterizan por: tamaño, forma y composición. Se aplica especialmente el concepto general de forma, aplicado a sistemas complejos, que incluye además de las proporciones geométricas, factores como patrones de flujo, perfiles de concentración, etc. (González, 2000 y Domínguez, 2009).

Tipos de semejanza más importantes son:

- Semejanza geométrica (dimensiones proporcionales).
- Semejanza mecánica.
  - ✓ Semejanza estática (deformaciones proporcionales).
  - ✓ Semejanza cinemática (tiempos proporcionales).
  - ✓ Semejanza dinámica (fuerzas proporcionales).
- Semejanza térmica (temperaturas proporcionales).
- Semejanza química.

Específicamente para los reactores de tanque agitado el escalado se basa usualmente en la semejanza geométrica, donde se ignoran las posibles diferencias de densidades entre los

reactores definidos como modelo y prototipo. Las relaciones de escalado son significativamente simples cuando se escala con semejanza geométrica y cuando el régimen de flujo del reactor de menor escala es completamente turbulento. (Nauman, 2008 y López, 2013).

Las relaciones de magnitud o escalado específicamente para la semejanza geométrica se pueden medir especificando proporciones entre distintas mediciones en un mismo cuerpo (factores de forma) o comparando mediciones correspondientes en cuerpos diferentes (relaciones o factores de escala). En el primer caso para comparar dos cuerpos dados se requieren valores de un cierto número de factores de forma (altura / diámetro, ancho / espesor, etc), en el segundo basta un único y constante factor de escala. (González, 2000 y Domínguez, 2009).

Una vez establecido el método basado en el Principio de Semejanza es necesario precisar un criterio de escalado. Se han desarrollado diferentes métodos o criterios para el escalado de los reactores, los cuales, de manera general, puede resumirse en:

- Método del tanteo y error.
- Método del análisis dimensional (incluyendo análisis de régimen).
- Método de la modelación matemática.
- Método fundamental.
- Método semi-fundamental.
- Método Reglas del pulgar.

Dentro de los criterios de escalado el método “Reglas del pulgar” es el más empleado para reactores químicos y mezcladores. El método se basa en mantener constante al

cambiar de escala un determinado parámetro que está relacionado con la calidad del mezclado del sistema (Pérez y Rodríguez, 2001). De manera general este procedimiento implica la condición de similitud geométrica, así, manteniendo constante un determinado parámetro de escalado la determinación del grado de agitación (del modelo o prototipo; de acuerdo al proceso de escalado) puede obtenerse mediante las siguientes relaciones que se muestran en la tabla 1.1: (Yll, 2013)

*Tabla 1.1 Criterios de escalado para reactores geoméricamente similares con propiedades físicas constantes.*

<i>Criterio de escalado</i>	<i>Relación</i>	
Potencia de agitación por unidad de volumen (P/V)	$(P/V) \propto N_1^3 D_1^2$	$N_1/N_2 = (D_2/D_1)^{2/3}$
Coficiente volumétrico de transferencia de masa ( $k_L \cdot a$ )	$k_{La} \propto (P/D^3)^a$	$N_1/N_2 = (D_2/D_1)^{2/3}$
Velocidad de agitación (v)	$v \propto N D_i$	$N_1/N_2 = (D_2/D_1)$
Número de Reynolds ( $N_{Re}$ )	$N_{Re} \propto N D_i^2$	$N_1/N_2 = (D_2/D_1)^2$
Tiempo de mezclado ( $t_M$ )	$f = t_M N^{2/3} D^{-1/6}$	$N_2/N_1 = (D_2/D_1)^{1/4}$
Caudal impulsado por el agitador por unidad de volumen (Q/V)	$Q/V \propto N$ $P \propto N^3 D_i^5$	$P_1/P_2 = (D_1/D_2)^5$ y $N_1 = N_2$

Los criterios más empleados para el escalado son el de potencia de agitación por unidad de volumen y el coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

## **1.8 Aspectos sobre la termodinámica y los procesos de transferencia de calor.**

Para la determinación de la energía involucrada (producida o consumida) en los procesos industriales, según indica García, (2013) se aplican las leyes o principios de la termodinámica. La llamada primera ley (o primer principio) de la termodinámica es una de las bases del balance energético de cualquier sustancia. Annamalai y Puri, (2002) plantean que en su forma más general puede enunciarse como la energía de un sistema no se crea ni se destruye, sólo puede transformarse de un tipo a otro.

La expresión que rige el análisis energético, según expresa Castellanos *et al.*, (2001) y que no es más que la conocida Primera Ley de la Termodinámica, puede representarse en su forma más general como Energía que entra - Energía que sale = Energía que acumula. Por su parte Cruz y Pons, (1985) señalan que el balance de energía permite cuantificar los cambios energéticos operados en un sistema partiendo de la información necesaria para realizar los cálculos. Moran y Shapiro, (2006) y (Himmelblau, 1997) añaden además que en el campo de la ingeniería de procesos las formas más frecuentes en que se manifiesta la energía son: la energía interna, la energía potencial, la energía cinética, el calor y el trabajo. Todas estas formas de energía se emplean o no en dependencia del tipo de sistema que se estudia.

Específicamente durante el calentamiento o enfriamiento de un cuerpo, según indica García, (2013) el calor suministrado o cedido se relaciona con la masa calentada o enfriada, la capacidad calorífica y la variación de la temperatura. Por otro lado durante el cambio de fase (fusión/solidificación o ebullición/condensación), el calor absorbido o cedido está dado por la masa calentada o enfriada y el calor latente de la sustancia.

También para la mayoría de los casos según indica Viera y Soler, (1991), la intensidad de intercambio de calor entre el fluido reaccionante y el exterior viene dada por el coeficiente global de transmisión de calor, el área de transferencia de calor y la diferencia de temperatura efectiva entre el fluido reaccionante y el medio de intercambio térmico.

Del estudio de la termodinámica según plantea Incropera y De Witt, (1999) no proporciona información alguna con respecto a la naturaleza de la interacción de un sistema con su alrededor o la rapidez con la que esta se produce; y a través del estudio de los modos de transferencia de calor y mediante el desarrollo de relaciones matemáticas para calcular las velocidades de transferencia de calor se puede ampliar el análisis termodinámico.

Este punto de vista es compartido por Holman, (1999) y Kern, (1999) donde además añaden que los diferentes tipos o modos de transferencia de calor son la conducción, la convección y la radiación. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario –que puede ser un sólido o fluido- se utiliza el término de conducción para referirse a la transferencia de calor que se produce a través del medio. Por su parte Bejan y Kraus, (2003) y Lienhard, (2004) indican que el término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurre entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. En cambio la radiación térmica que se considera como todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas y por tanto en ausencia de un medio existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas. (Fernández, 2013)

Según expresa Incropera y De Witt, (1999) la ecuación o modelo para determinar la transferencia neta de calor por conducción se basa en la ley de Fourier, mientras que el modelo apropiado para evaluar el proceso de transferencia neta de calor por convección según plantea Moncada, (2013) se toma como base la ley de enfriamiento de Newton el cual tiene en cuenta el coeficiente de transferencia de calor y existen diferentes métodos o correlaciones empíricas para su determinación en dependencia de la geometría del equipo que se estudia. Por su parte para el modelo general de transferencia de calor neto por radiación térmica se basa en la segunda ley de la termodinámica o denominada también como la ley de la Potencia.

## **1.9 Análisis económico de procesos.**

Autores como Jiménez, (2003) plantean que el primer paso para establecer una actividad económica es necesario determinar o disponer de una inversión; y según indica Massé, (1963) la inversión es la materialización de medios económicos en bienes que van a ser utilizados en un proceso productivo de una empresa o unidad económica. Michelfelder, (2015) concuerda con lo anteriormente expuesto, agregando que a cambio de esa inversión se obtienen ingresos en forma de ventas, las cuales deben ofrecer un excedente adecuado sobre los costos que implica la operación del proceso para que éste tenga un potencial favorable de comercialización.

### **1.9.1 Métodos para estimar el costo de inversión de un proyecto.**

Existen diferentes métodos para estimar el costo de inversión como indica Jiménez, (2003) y Sievers, (2017); y dentro de los elementos que componen el costo de inversión

son: el costo de inversión para la producción, el costo de inversión para la distribución de la producción y el costo de inversión de las obras inducidas (Brizuela, 1987 y Luis, 2015). Entre los métodos más conocidos según reportan Brizuela, (1987) y Jiménez, (2003) se encuentran las curvas de costo las cuales utilizan información disponible de plantas de la misma tecnología previamente construida elaborando curvas de costo para diferentes capacidades, otro método es el denominado factor de William o coeficiente de escala, el cual emplea una correlación estadística que relaciona el costo de inversión con la capacidad productiva tanto del proyecto considerado con respecto al proyecto conocido. El método de Lang establece el costo de inversión a partir del costo de su equipamiento principal para lo cual existen establecidos factores de Lang que varían en dependencia de la planta utilizada, pero este método puede generar resultados que se desvían de la realidad apreciable y están también los paquetes de softwares como el CAPCOST que es uno de los más empleados para estimar inversiones dado que el mismo utiliza datos reales basándose en los resultados del diseño de equipos.

### **1.9.2 Indicadores de la eficiencia económica de la producción.**

Una vez determinado el costo de inversión es necesario obtener los indicadores económicos de la producción o también conocidos como indicadores de la eficiencia económica de la producción como el costo de producción, la ganancia, la rentabilidad, la estructura de costo y el punto de equilibrio. Además es necesario evaluar la eficiencia económica de un proyecto a partir de ciertos indicadores como el retorno de la inversión, el plazo de recuperación de la inversión, el valor actual neto y la tasa interna de



rentabilidad. Estos indicadores han sido planteados por Brizuela, (1987), (Bueno *et al.*, 1990), Peters y Timmerhaus, (1991) y Turton, (1998).

### **1.10 Conclusiones parciales del capítulo**

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. A partir de un análisis referente a la producción de impermeabilizantes a nivel mundial se puede constatar que existe una gran variedad de este tipo de recubrimiento; sin embargo, nuestro país no cuenta con producciones nacionales de este material provocando un costo elevado a partir de la importación de estos materiales; mientras que el empleo de materiales reciclados para producir impermeabilizantes de cubierta además de provocar un impacto positivo al medio ambiente se logra la sustitución de importaciones.
2. Se describe el impermeabilizante de cubierta denominado Mástique Asfáltico semisólido con polímero de goma elaborado por el Centro de Anticorrosivos y Tensoactivos (CEAT) perteneciente a la Universidad de Matanzas y las características de la instalación a escala de planta piloto donde se produce dicho material.
3. Con el estudio de los principios básicos para el escalado se puede realizar un diseño de equipos hacia una mayor escala a partir de la aplicación de las técnicas que se emplean para el escalado como la Teoría de los Modelos (teoría del

modelo y prototipo) que a su vez para utilizar dicha teoría es necesario la utilización de un método de escalado así como establecer un criterio de escalado.

4. A partir del análisis de los aspectos de la termodinámica y los procesos de transferencia de calor se puede establecer los principales parámetros para cuantificar los cambios energéticos para la mejora y eficiencia de un proceso.
5. El análisis económico proporciona el criterio de selección y clasificación de un proyecto de inversión para poder ser catalogado como factible económicamente para lo cual se determina una serie de indicadores que fundamentan el desarrollo eficiente de la propuesta.

## **CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS**

El objetivo principal de este capítulo es describir el procedimiento que se utiliza en la investigación para la propuesta del diseño de una planta de impermeabilizante de cubierta a partir de materiales reciclados, para ello primeramente se determina la demanda específicamente para este caso de estudio en la provincia de Matanzas y la capacidad de producción que va a presentar la planta propuesta. Además se realiza una descripción del proceso tecnológico propuesto, así como, las características de las materias primas para la elaboración del producto. Por otro lado, se realiza un escalado del equipo donde se obtiene el impermeabilizante, siendo este un reactor que se encuentra a nivel de planta piloto y se desea escalar para los equipos propuestos (reactor y mezclador) a un nivel industrial. Seguidamente se propone un balance de energía de dicho proceso con el objetivo de obtener el flujo de vapor necesario para satisfacer la demanda propuesta y se realiza un análisis económico para determinar la factibilidad económica de la planta propuesta.

### **2.1 Determinación de la demanda y la capacidad de producción para el proceso de obtención del impermeabilizante de cubierta compuesto de MAP.**

Se establece coordinación con la Vivienda Provincial de Matanzas, donde se pudo precisar la cantidad de edificaciones con problemas de impermeabilización de cubiertas en la provincia (ver tabla 2.1), las cuales no se ha logrado su impermeabilización debido a que el material empleado son las láminas con asfalto oxidado y algunas de ellas con láminas de aluminio. Estas tecnologías de recubrimiento resultan costosas debido a que contiene el recubrimiento asfáltico incorporado y algunas láminas de aluminio son

importadas. Además se ha verificado que la producción del asfalto oxidado producido en la Planta Cano de La Habana es limitado, incluso esta problemática se agudiza para la producción de láminas de aluminio debido a que depende de material importado.

En busca de una solución viable a esta problemática el Centro de Anticorrosivos y Tensoactivos, (CEAT) de la Universidad de Matanzas, ha desarrollado una serie de productos, a escala Planta Piloto, dentro de los cuales podemos hacer mención los recubrimientos y específicamente dentro de ellos el impermeabilizante de cubierta, siendo este elaborado a partir de materiales reciclados. Dicho producto está compuesto por una matriz asfáltica modificada con polímero (MAP), constituido por dos componentes esenciales, la matriz (cemento asfáltico) y el refuerzo (polímero: polvo o virutas de goma de los neumáticos), unidos a través de un agente enlazante (jabón). Por lo tanto, se realiza una propuesta para obtener dicho producto de producción nacional a escala industrial capaz de satisfacer la demanda establecida.

*Tabla 2.1 Cantidad de edificaciones en la provincia de Matanzas con problemas de impermeabilización de cubiertas.*

<i>Municipios</i>	<i>Cantidad de edificios</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
Matanzas	410	129150
Cárdenas	416	131040
Martí	28	8820
Colón	151	47565
Perico	45	14175
Jovellanos	128	40320

Betancourt	48	15120
Limonar	31	9765
Unión de Reyes	40	12600
C. Zapata	2	630
Jagüey Grande	113	35595
Calimete	38	11970
Los Arabos	34	10710
<i>Total</i>	<i>1484</i>	<i>467460</i>

Para determinar la capacidad de producción que se necesita para satisfacer la demanda primeramente se conoce que el espesor estimado del impermeabilizante es de 10 mm como promedio, por lo tanto, para un espesor de 10mm y  $1\text{m}^3$  del producto se obtiene  $100\text{m}^2$  de techo a impermeabilizar ( $1\text{m}^3 / 0,01\text{m} = 100 \text{m}^2$ ). Además se conoce que la densidad del producto es de  $1080 \text{kg}/\text{m}^3$  y su rendimiento por metro cuadrado sería de  $10,8 \text{kg}/\text{m}^2$  debido a que  $1\text{m}^3$  equivale a  $100 \text{m}^2 = 10,8\text{kg}/\text{m}^2$ .

Para este diseño de planta se estima la demanda del producto a partir de la cantidad de metros cuadrados a impermeabilizar por el rendimiento del producto, para lo cual se obtiene un valor de  $5048568\text{kg}$  que se necesitan producir del material impermeabilizante para cubrir la demanda real de la provincia. Para ello esta cantidad de material a producir se divide en tres producciones anuales para garantizar que la planta produzca durante tres años consecutivos dado que el impermeabilizante tiene un tiempo de duración de tres a cinco años y garantiza así una vez cumplido su tiempo efectivo realizar un mantenimiento en aquellas edificaciones que lo necesiten. Además se conoce por investigadores del Centro Investigación para el Desarrollo de la Construcción (CIDC) en

la Habana que las demás provincias del país presentan una gran demanda de este tipo de material, por lo que esta planta podría satisfacer la demanda de otras provincias e incluso introducirse como un producto de importación dado la calidad y efectividad que presenta el material así como su bajo costo dado que su producción se realiza a partir de materiales reciclados, que actualmente presentan un problema significativo desde el punto de vista ambiental para el tratamiento de los mismos.

Por lo tanto la capacidad de producción (volumen de producción: N) se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$N = \frac{da}{s/a \cdot p/d \cdot d/s} \quad (2.1)$$

Donde:

da: Demanda anual (1682856kg/año).

s/a: Cantidad de semanas propuestas que se laborarán al año (49).

p/d: Cantidad de producciones al día (2).

d/s: Cantidad de días a producir en la semana (5).

Por lo tanto el volumen de producción sería de 3434,40kg/lote.

## **2.2 Propuesta del diseño de planta para la producción de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.**

Se necesita satisfacer la demanda de 3434,40kg/lote del impermeabilizante mástique asfáltico semisólido con polímero de goma en una planta productora de dicho material cumpliendo con los indicadores de eficiencia económica, seguridad e impacto ambiental.

### Alternativas de solución:

1. Importar el producto; este producto pudiera importarse, pero no se realiza porque la política del país es reducir las importaciones y generar nuevos productos en base de materias primas de producción nacional o reciclables.
2. Remodelar una industria existente; se pudiera realizar una ampliación de una planta, pero no es la mejor opción porque no existe ninguna planta que produzca este tipo de impermeabilizante en nuestro país.
3. Diseñar una planta química.

La tercera alternativa es la seleccionada siendo la de mayor viabilidad actualmente, debido a que las materias primas para la producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma son recicladas y desde el punto de vista ambiental es una solución factible la producción de nuevos materiales que permita la sustitución de importaciones haciendo un uso adecuado de materiales reciclados. Además, se cuenta con el personal calificado para el diseño y puesta en marcha de la planta; se pretende que la misma satisfaga la demanda requerida y logre obtener un producto de calidad, al menor costo

posible teniendo en cuenta el impacto ambiental de su obtención. De manera que con una propuesta de diseño de planta se podría satisfacer la demanda del producto.

### **2.2.1 Descripción de la propuesta para el proceso de producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.**

Primeramente se tiene como base a escala de planta piloto las cantidades de materiales que se producen por lote para la producción de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma, las cuales se muestran en la tabla 2.2. Estas medidas están en función de la cantidad de producto a obtener, es decir de la masa de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma, por lo tanto, se representan los porcentos de materiales en base al producto final que se obtiene.

En el proceso de producción de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma se emplean como materias primas el agua, cemento, residual de policosanol, aceite usado, cemento asfáltico y polvo o viruta de goma de neumáticos usados; además se conoce que el equipo donde se produce actualmente el jabón insoluble en la planta piloto tiene una capacidad de 0,88m<sup>3</sup>.

*Tabla 2.2 Cantidades de materiales para la producción a escala planta piloto del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.*

<i>Materiales</i>	<i>%</i>	<i>Cantidad</i>
Residual policosanol [kg]	8,8	132
Cemento [kg]	1,2	18
Agua [L]	2,3	34,5



Aceite [kg]	40	600
Cemento asfáltico [kg]	34	510
Goma [kg]	16	240
Mástique semisólido [kg]	100	1500

La propuesta del proceso de producción de este recubrimiento se muestra en el Anexo 2 realizada a partir del software de diseño ABC FlowCharter 4.0 el cual es un programa para el diseño gráfico como diagramas de flujo de información y de procesos.

El proceso propuesto comienza en el tanque mezclador para la preparación de la lechada de cemento o cemento hidrolizado [3], a partir de cemento [1] y agua [2]. En este mezclador ocurre la transformación de los óxidos de calcio y magnesio en sus respectivos hidróxidos.

Una vez elaborada la mezcla [3] se incorpora al reactor donde reacciona con los jabones de potasio presentes en el residual de policosanol [4] para formar jabones de calcio y magnesio. Estos jabones emulsionan con el tipo de aceite usado 15W40 [5] formando jabón insoluble [6]. Para que ocurra la reacción de saponificación es necesario suministrar calor al proceso hasta alcanzar una temperatura de 150°C y una presión de 5atm para mantenerla constante durante 1 hora lográndose la emulsión de la mezcla y evaporar el agua contenida en la misma.

El jabón insoluble es enviado al mezclador enchaquetado donde se le añade el cemento asfáltico [9] que previamente ha sido fundido en un tanque enchaquetado a una temperatura de 120°C y presión atmosférica. Una vez mezclados estos materiales se le adiciona polvo o viruta de goma [10], que anteriormente ha pasado por un proceso de

tamizado. La mezcla se agita con calentamiento por vapor manteniendo una temperatura de 120°C, hasta lograr su homogenización para obtener el mástique asfáltico semisólido con polímero goma que luego es descargado y envasado en tanques [11].

## **2.2.2 Características de las materias primas para la elaboración del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.**

A continuación se exponen las principales características fisicoquímicas de los materiales que constituyen el mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.

### **2.2.2.1 Residual de policosanol (CNS).**

La producción de policosanol en la Agrupación de Plantas de Productos Naturales a partir de cera de caña de azúcar, constituye un proceso tecnológico industrial cuyo carácter estratégico para el país, hace de sus resultados una información clasificada de la cual aparece muy poco reportado en la literatura. Los residuales de la producción del Policosanol, en general, independientemente del método de separación empleado, están compuestos por sales de ácidos grasos, ésteres no saponificados, ácidos grasos y alcoholes superiores que no constituyen el principio activo del Policosanol, además de hidrocarburos superiores. En el Anexo 3 se ofrece la composición de los ácidos grasos obtenidos por hidrólisis del residual con ácido sulfúrico, ya que todos estos ácidos grasos se encuentran formando jabones de potasio en el residual; además de la caracterización físico-química de este residual. (García, 2005).

#### **2.2.2.2 Cemento Portland (P-350).**

El cemento Portland es uno de los materiales de construcción utilizados para la producción de concreto y hormigón. Los principales componentes del cemento Portland son los óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro (III) y magnesio (García, 2013). En el Anexo 4 se muestran las principales características físicas y químicas del cemento Portland 350, siendo este el propuesto a utilizar en la producción de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.

#### **2.2.2.3 Aceite usado tipo SAE 15W40.**

El tipo de aceite SAE 15W40 es un aceite mineral utilizado para lubricación de motores tanto de gasolina como diésel, está compuesto por una mezcla compleja de hidrocarburos y aditivos. Las propiedades físicas de este aceite se muestran en el Anexo 5.1 (Totten, 2003).

#### **2.2.2.4 Cemento asfáltico.**

El cemento asfáltico es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente proveniente del residuo generado en el proceso de destilación del petróleo crudo. De acuerdo a la disponibilidad de la Refinería Níco López de la Habana y la Refinería de Cienfuegos el cemento asfáltico que se obtiene es del tipo 50-70. Las propiedades físicas de este material se muestran en el Anexo 5.2 (Speight, 2007).

#### **2.2.2.5 Polvo o viruta de goma proveniente de neumáticos desechados.**

Estos materiales debido a su elasticidad, adherencia, resistencia a los microorganismos, impermeabilidad al agua y resistencia a los impactos ha extendido su uso para la producción de recubrimientos e impermeabilizantes (Echeverría *et al.*, 2005; Echeverría *et al.*, 2006 y Echeverría *et al.*, 2007). En el anexo 6 según la Rubber Manufacturers Association, se muestra la composición de los diferentes tipos de neumáticos así como sus características físicas según plantea Perry y Green (2008).

#### **2.2.3 Cantidades de materiales para la propuesta de producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.**

Partiendo que se conoce las cantidades de materiales que se emplean para la producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma y los porcentos en función de la producción total de impermeabilizante que representa a escala de planta piloto se puede obtener para la propuesta las cantidades de materiales que se necesitan para satisfacer el volumen de producción determinado en el epígrafe 2.2 para cumplimentar una producción de 3434,40kg/ lote de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.

#### **2.3 Método empleado para el escalado del reactor y mezclador.**

En las condiciones a escala de planta piloto el equipo donde se produce el impermeabilizante de cubierta como se menciona en el epígrafe anterior es un reactor debido a que primeramente funciona como reactor y posteriormente como mezclador; por lo tanto, se decide realizar el escalado de este equipo de escala planta piloto a escala industrial tanto para el reactor como el mezclador. El objetivo de este epígrafe es

describir el procedimiento para el escalado de un reactor que se encuentra a escala de planta piloto (modelo) hacia un reactor y mezclador para la producción a escala industrial (prototipo), para lo cual se desea que el prototipo sea morfológica y operacionalmente semejante al modelo por lo que se utiliza el método basado en los Principios de Semejanza y específicamente el de semejanza geométrica. Para ello tomando como modelo un reactor que se encuentra a escala de planta piloto en el CEAT el cual tiene una capacidad de  $0,88\text{m}^3$  y se emplea para la elaboración del jabón insoluble que además va a producir en el prototipo (reactor) el mismo producto. Las características geométricas del reactor así como la figura geométrica se muestran en el Anexo 7. También fue necesario emplear ecuaciones para determinar otras medidas del equipo (modelo) a partir del uso de las siguientes expresiones:

Para determinar el volumen tanto del reactor como el mezclador se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$V = V_{cil} + V_{c.t.i} \quad (2.2)$$

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h \quad (2.3)$$

Donde:

$V_{cil}$ : Volumen del cilindro ( $\text{m}^3$ ).

$d$ : diámetro del cilindro (m).

$h$ : altura del cilindro (m).

$$V_{c.t.i} = \frac{\pi}{12} \cdot h \cdot (d_1^2 + d_2^2 + d_1 \cdot d_2) \quad (2.4)$$

Donde:

$V_{c.t.i}$ : Volumen del cono truncado inferior ( $m^3$ ).

$h$ : altura del cono truncado inferior (m).

$d_1$ : diámetro de mayor (se corresponde con el diámetro del cilindro) (m).

$d_2$ : diámetro menor (se corresponde con el diámetro del cono truncado menor) (m).

Posteriormente se determina el volumen de líquido en el cilindro ( $V_{liq.cil}$ ) a partir de la diferencia entre el volumen total de líquido del cilindro ( $V_{total.liq}$ ) y el volumen del cono truncado inferior ( $V_{c.t.i}$ ):

$$V_{liq.cil} = V_{total.liq} - V_{c.t.i} \quad (2.5)$$

Una vez determinado el volumen de líquido en el cilindro se obtiene la altura de líquido en el cilindro ( $h_{liq.cil}$ ) de acuerdo con la ecuación 2.3.

Además se determina la altura total de líquido en el cuerpo ( $H_{total.liq}$ ) del equipo mediante la expresión siguiente:

$$H_{total.liq} = h_{liq.cil} + h_{c.t.i} \quad (2.6)$$

Donde  $h_{c.t.i}$  se refiere a la altura del cono truncado inferior.

Otro término que se determina es la altura de la camisa del equipo ( $H_{camisa}$ ) la cual depende de la altura del cilindro ( $h_{cil}$ ) y del cono truncado inferior ( $h_{c.t.i}$ ), descontándole 10cm (altura entre el cilindro hasta donde comienza la camisa).

$$H_{camisa} = (h_{cil} + h_{c.t.i}) - 0,10 \quad (2.7)$$

Igualmente se obtiene la altura del agitador en el equipo, en función de la de la altura del cilindro ( $hcil$ ), del cono truncado inferior ( $hc.t.i$ ) y del cono truncado superior ( $hc.t.s$ ) restándole 10cm (altura del fondo del equipo al agitador).

$$H_{agit} = (hc.t.s + hcil + hc.t.i) - 0,10 \quad (2.8)$$

Para ello, de acuerdo a Coker (2001), Zlokarnik (2006), Nauman (2008) y López, (2013) se toma como referencia la semejanza de las características geométricas, el principio de operación y los materiales de construcción entre el reactor que sirve como modelo (planta piloto) y el reactor de  $2,02\text{m}^3$  y mezclador de  $3,71\text{m}^3$  a escala industrial (prototipos) semejante al utilizado en la planta piloto; estos valores se obtienen a partir de la propuesta de los materiales realizados en el epígrafe 2.2.3. Por lo tanto, para el escalado del prototipo a partir del modelo se realiza a partir de las relaciones dimensionales del modelo teniendo en cuenta la similitud geométrica desde el punto de vista morfológico del equipo. Estas relaciones se muestran a continuación en la siguiente tabla:

*Tabla 2.2 Relaciones dimensionales del reactor de escala planta piloto (modelo).*

<i>Relaciones Dimensionales</i>	<i>Valor</i>
Hliq-cil/Dint	0,81
Dint/Da	3,18
Hcil/Dint	1,00
Dext/Dint	1,19
Hcamisa/Dint	1,33
Hf/Hliq-cil	0,53

Df/Dint	0,12
Ht/Hliq-cil	0,22
E/Da	0,30
Ho/Hliq-cil	0,24
Lp/Da	0,48
Hp/Da	0,24
Dbm/Dint	0,25
Ecam/Dint	0,10
Ha/Da	4,85
Ep/Da	0,045
Dt/Dint	0,29

Para comprender el significado de las nomenclaturas utilizadas se propone que se consulte el anexo 7.

La metodología de escalado propuesta no basta solamente con estas relaciones dimensionales dado que es necesario conocer ciertos términos del prototipo como el diámetro los restantes parámetros geométricos del reactor, dado que solamente se cuenta con los volúmenes de líquido de los prototipos a partir del epígrafe 2.2.3. Por lo tanto, se propone que el diámetro interior del prototipo se determine en función del volumen del cilindro. Para ello es necesario determinar previamente mediante la expresión 2.5 el volumen de líquido en el cilindro ( $V_{liq.cil}$ ) y se determina el porcentaje que representa ese volumen con respecto al volumen total de líquido ( $V_{total.liq}$ ) en el equipo del modelo.

$$\frac{V_{liq.cil}}{V_{total.liq}} = \frac{\%}{100} \quad (2.9)$$



Por lo tanto, para el reactor y el mezclador a escala industrial (prototipo) se fija entonces la siguiente ecuación para ser sustituida en la expresión 2.3.

$$V_{cil} = \% \cdot V_{total} \quad (2.10)$$

Luego a partir de la ecuación 2.3 la altura del cilindro se trabaja en función del diámetro según la relación dimensional  $H_{liq-cil}/D_{int} = 0,81$  y se despeja el diámetro interior del cilindro. Una vez obtenido el diámetro se determina los demás parámetros geométricos haciendo uso de las relaciones dimensionales que fueron ya expuestas con anterioridad en la tabla 2.2.

El criterio de escalado que se propone es el denominado de Potencia por unidad de Volumen ( $P/V$ ). Dicho criterio implica la condición de similitud geométrica de acuerdo a la bibliografía consultada para tanques agitados; por lo tanto se emplea la siguiente ecuación para determinar la potencia del agitador del prototipo:

$$\frac{P_1}{V_1} = \frac{P_2}{V_2} \quad (2.11)$$

Donde:

$P_1$  y  $V_1$ : se refiere a la potencia del agitador y volumen del modelo respectivamente (en kW y  $m^3$ ).

$P_2$  y  $V_2$ : se refiere a la potencia del agitador y volumen del prototipo respectivamente (en kW y  $m^3$ ).

De la ecuación anterior se deriva la siguiente expresión de acuerdo a este criterio, con lo cual es posible determinar el grado de agitación del prototipo:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^{2/3} \quad (2.12)$$

Donde:

$N_1$  y  $D_1$ : se refiere al grado de agitación y diámetro del modelo respectivamente (en rpm y m).

$N_2$  y  $D_2$ : se refiere al grado de agitación y diámetro del prototipo respectivamente (en rpm y m).

## **2.4 Balance de energía para el proceso de producción del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.**

El objetivo principal de la realización del balance energético es determinar la energía térmica y el flujo de vapor necesario para los procesos que necesitan calentamiento específicamente para el reactor, el tanque de calentamiento de cemento asfáltico y el mezclador.

### **2.4.1 Balance de energía en el reactor:**

Para lograr la reacción en el reactor es necesario elevar la temperatura a 150°C y para ello se suministra una fuente de calor en forma de vapor de agua, con la cual se alcanza evaporar el agua contenida en la mezcla. Por otro lado las cantidades de materiales que se emplean para la propuesta del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma, se

obtienen a partir de los porcentajes que representan en función de la producción total de impermeabilizante a escala de planta piloto; por lo tanto, el calor necesario para el calentamiento de los materiales en el reactor y evaporar el agua, se calcula por la siguiente ecuación:

$$Q_{abs\_1} = (m_1 \cdot Cp_1 + m_2 \cdot Cp_2 + m_4 \cdot Cp_4 + m_5 \cdot Cp_5) \cdot (T_f - T_i) + m_1 \cdot \lambda \quad (2.13)$$

Dónde:

$m_1$ : masa agua, (kg).

$m_2$ : masa de cemento, (kg).

$m_4$ : masa de residual de policosanol, (kg).

$m_5$ : masa de aceite usado, (kg).

$Cp_1$ : capacidad calórica del agua, (kJ/kg·K).

$Cp_2$ : capacidad calórica del cemento, (kJ/kg·K).

$Cp_4$ : capacidad calórica del residual de policosanol, (kJ/kg·K).

$Cp_5$ : capacidad calórica del aceite, (kJ/kg·K).

$\lambda$ : calor latente del agua, (kJ/kg).

$T_f$ : Temperatura final, (K).

$T_i$ : Temperatura inicial, (K).

Además se determina el calor absorbido necesario para mantener la temperatura constante durante el tiempo que ocurra la reacción; para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{abs\_2} = U \cdot A \cdot (T_v - T_m) \quad (2.14)$$

Donde:

$U$ : coeficiente global de transferencia de calor, (W/m<sup>2</sup>·°C).

$A$ : Área de transferencia de calor, (m<sup>2</sup>).

$T_v$ : Temperatura del vapor, (°C).

$T_m$ : Temperatura de la mezcla, (°C).

Para determinar  $T_v$  se considera que el flujo de calor es constante. Por lo tanto, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$q_T = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (2.15)$$

$$\Delta T = \pi \cdot (T_{pared\_1} - T_{pared\_2}) \quad (2.16)$$

$$R_T = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{pared}} \cdot \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (2.17)$$

Donde:

$q_T$ : Flujo de calor total por convección y por radiación, (W/m<sup>2</sup>).

$\Delta T$ : Variación de la temperatura entre la chaqueta y el equipo.

$R_T$ : Resistencia térmica.

$T_{pared\_1}$  y  $T_{pared\_2}$ : Temperatura de la pared donde circula el vapor y por donde circula la mezcla respectivamente, (°C).

$\lambda_{pared}$ : Conductividad térmica del material, (W/m<sup>2</sup>·°C).

$d_2$  y  $d_1$ : diámetro exterior e interior del equipo, (m).

Para obtener el coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ) se determina a partir de la ecuación siguiente:

$$U = \frac{Q_T}{A \cdot \Delta T_{\log}} \quad (2.18)$$

Donde el  $\Delta T_{\log}$  se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_{mayor} - \Delta T_{menor}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{mayor}}{\Delta T_{menor}} \right)} \quad (2.19)$$

Donde el  $\Delta T_{mayor}$  y  $\Delta T_{menor}$  se refiere a la variación de la temperatura entre el vapor y los materiales al inicio y al final del proceso.

Por otro lado, el  $Q_T$  se refiere al calor absorbido hasta alcanzar la temperatura de 150°C ( $Q_{abs\_1}$ ), pero para ello se debe calcular antes el tiempo que se demora en alcanzar esa temperatura antes de iniciarse la reacción. Para ello se propone un método iterativo, primeramente se determina para una hora de calentamiento el calor perdido ( $Q_{perd}$ ) en

unidades de kJ según la metodología que se propone seguidamente y el calor cedido ( $Q_{ced}$ ). Posteriormente para un fluido que se encuentra estancado en un tanque es necesario determinar la variación de la temperatura con respecto al tiempo, para obtener el tiempo necesario que requiere el producto para alcanzar la temperatura establecida a partir del calor absorbido ( $Q_{abs}$ ) por dicho material por lo tanto se puede plantear que:

$$\frac{\partial mH}{\partial t} = Q \quad (2.20)$$

Donde se sabe que  $mH = mCp\Delta T$  y  $Q = Q_{abs} = Q_{ced} - Q_{perd}$ , por lo tanto:

$$\frac{\partial mCp\Delta T}{\partial t} = Q_{ced} - Q_{perd} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{ced} - Q_{perd}}{m_1 \cdot Cp_1 + m_2 \cdot Cp_2 + m_4 \cdot Cp_4 + m_5 \cdot Cp_5} \quad (2.22)$$

Se calculan los términos de la ecuación anterior para una hora de calentamiento como se explica anteriormente y para el desarrollo de dicha ecuación es necesario la utilización de un método matemático capaz de resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). Entre los métodos numéricos existentes para la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias, los métodos de Runge-Kutta son los más difundidos y utilizados para la resolución de estas ecuaciones. Estos métodos son de un solo paso dado que solo utilizan la información de un punto anterior para calcular un nuevo punto, pero requieren evaluar la derivada en varios puntos intermedios. La variante más conocida es el método de 4to orden, usualmente designado como método de Runge-Kutta sin referencia al orden, el

cual se basa en la ecuación 2.23 (Viera, 1996), por lo que se determina que el método de Runge-Kutta de cuarto orden sería el idóneo para la solución de dicha ecuación.

$$T_{n+1} = T_n + \frac{t}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.23)$$

$T_n$  = Valor de la temperatura inicial (25°C)

$t$ : Paso a utilizar (horas).

Una vez determinada la variación de la temperatura con respecto al tiempo, se obtiene mediante la aplicación del método en el software Matlab el tiempo que demora hasta alcanzar la temperatura de 150°C y se obtiene el  $Q_{abs\_1}$  en unidades de W para ser empleado en la ecuación 2.18. Luego se calcula el coeficiente global de transferencia de calor y se obtiene el calor absorbido para mantener la temperatura de 150°C ( $Q_{abs\_2}$ ) según la ecuación 2.14. Posteriormente se determina el calor absorbido total (sumando los  $Q_{abs\_1}$  y 2) y se obtiene el  $Q_{ced}$ , para calcular nuevamente por el método iterativo el tiempo que demora en alcanzar la temperatura de 150°C, hasta obtener un error menor del 5% entre los coeficientes globales de transferencia de calor, para lo cual se obtiene así el coeficiente global de transferencia de calor y el tiempo que demora la mezcla en alcanzar la temperatura requerida.

Para el cálculo de las pérdidas energéticas en el reactor se tiene en cuenta las pérdidas por convección libre y por radiación hacia el medio exterior del equipo, por lo tanto, se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{perd} = q_{rad} \cdot A_T + q_{conv} \cdot A_T \quad (2.24)$$

Donde:

$q_{rad}$ : flujo de calor perdido por radiación ( $W/m^2$ ).

$A_T$ : Área de transferencia de calor ( $m^2$ ).

$q_{conv}$ : flujo de calor perdido por convección libre ( $W/m^2$ ).

Para determinar el flujo de calor perdido por radiación ( $q_{rad}$ ) se emplea la ecuación siguiente según plantea (Incropera y De Witt, 1999):

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{air}^4) \quad (2.25)$$

Se establece que la temperatura de la superficie del equipo ( $T_s$ ) por cuestiones de seguridad y salud del trabajo debe ser de 45°C y la temperatura del aire ( $T_{air}$ ) o del medio exterior es de 25°C.

Donde:

$\varepsilon$ : Emisividad; según plantea Rockwool, (2012) para el aislamiento térmico de lana de roca la emisividad se encuentra entre 0,90-0,92.

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann, ( $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ).

$T_s$ : Temperatura absoluta de la superficie, (318K).

$T_{air}$ : Temperatura del aire, (298K).



Para determinar el flujo de calor perdido por convección libre ( $q_{conv}$ ) se tiene en cuenta cada sección del equipo: la tapa, el cuerpo y la base, para ello se emplea la ecuación siguiente:

$$q_{CONV} = q_{TAPA} + q_{CUERPO} + q_{BASE} \quad (2.26)$$

Donde:

$q_{TAPA}$ : Flujo de calor perdido en la tapa, ( $W/m^2$ ).

$q_{CUERPO}$ : Flujo de calor perdido en el cuerpo, ( $W/m^2$ ).

$q_{BASE}$ : Flujo de calor perdido en la base, ( $W/m^2$ ).

Para determinar los flujos de calor correspondientes a cada sección (tapa, cuerpo, base) del equipo se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.27)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección para cada sección del equipo en cuestión, ( $W/m^2 \cdot K$ ).

$T_\infty$ : Temperatura del medio exterior, (K).

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) para cada sección se emplea la siguiente metodología según plantea (Incropera y De Witt, 1999), destacando que todas

las propiedades termofísicas se evalúan a partir de la temperatura de la película:

$T_f = (T_s + T_\infty) / 2 = 35^\circ C$  y se obtienen en la tabla A.4 (Incropera y De Witt, 1999);

$$h_{tapa, cuerpo, base} = \frac{Nu_{tapa, cuerpo, base} \cdot k}{L_{tapa, cuerpo, base}} \quad (2.28)$$

Donde:

$Nu_{tapa, cuerpo, base}$ : Número de Nusselt para cada sección del equipo en cuestión.

$k$ : Conductividad térmica,  $(26,89 \cdot 10^{-3} \text{W/m} \cdot \text{K})$ .

$L_{tapa, cuerpo, base}$ : longitud característica de la geometría en cuestión (m).

El número de Nusselt para cada sección del equipo se determina a partir de las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$Nu_{tapa} = 0,15 \cdot Ra_{tapa}^{1/3} \quad (2.29)$$

$$Nu_{cuerpo} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{cuerpo}^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.30)$$

$$Nu_{base} = 0,27 \cdot Ra_{base}^{1/4} \quad (2.31)$$

Donde:

$Ra$ : Número de Rayleigh (para la tapa, el cuerpo y la base).

$Pr$ : Número de Prandtl,  $(0,706)$ .

Para ello se determina el número de Rayleigh para cada sección del equipo, según se muestra a continuación:

$$Ra_{\text{tapa,cuerpo,base}} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_\infty) \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (2.32)$$

Donde:

$g$ : aceleración gravitacional, (9,8m/s<sup>2</sup>).

$\beta$ : Coeficiente de expansión térmica,  $\left(\frac{1}{Tf}\right)$ .

$\alpha$ : Difusividad térmica, (23,68·10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s).

$\nu$ : Viscosidad cinemática, (16,69·10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s).

$T_w$ : Temperatura de la superficie (K).

El área de transferencia de calor lateral ( $A_T$ ) se determina igualmente para cada sección del equipo; precisando que las dimensiones que se utilizan para el cálculo del  $A_T$  se obtienen por el escalado del reactor que se expone en el epígrafe anterior.

$$A_T = A_{\text{tapa}} + A_{\text{cuerpo}} + A_{\text{base}} \quad (2.33)$$

Para la tapa y la base del equipo como son conos truncados se emplea la siguiente ecuación:

$$A = \pi \cdot s \cdot (r_1 + r_2) \quad (2.34)$$

$$s^2 = (r_1 - r_2)^2 + h^2 \quad (2.35)$$

Donde:

$\pi$ : Número de Pi (3,1416).

$s$ : Generatriz del cono truncado de la tapa y la base, (m).

$r_1$  y  $r_2$ : Radio mayor y menor respectivamente del cono truncado de la tapa y la base, (m).

$h$ : Altura del cono truncado, (m).

Para el cuerpo del equipo como es un cilindro se utiliza la ecuación siguiente:

$$A_{\text{cuerpo}} = \pi \cdot d \cdot h_{\text{cuerpo}} \quad (2.36)$$

Donde:

$d$ : Diámetro del cilindro, (m).

$h_{\text{cuerpo}}$ : Altura del cilindro, (m).

Una vez obtenido el  $Q_{\text{perd}}$  se multiplica por el tiempo de permanencia necesario en el reactor para que ocurra la reacción el cual debe ser de 1,5 hora para obtener dicho resultado en kJ. Posteriormente, se procede a calcular el calor cedido ( $Q_{\text{ced}}$ ), el % de pérdidas de calor ( $\%P_{\text{érd}}$ ) y el flujo necesario de vapor de agua ( $m_{\text{vapor}}$ ) para el calentamiento del equipo:

$$Q_{\text{ced}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{perd}} \quad (2.37)$$

$$\% P\acute{e}rd = \frac{Q_{perd}}{Q_{ced}} \cdot 100\% \quad (2.38)$$

$$Q_{ced} = \frac{m_{vapor} \cdot \lambda}{t} \quad (2.39)$$

#### 2.4.2 Balance de energía en el calentador de cemento asfáltico:

Para lograr que el cemento asfáltico se funda es necesario elevar la temperatura a 120°C y para ello se suministra una fuente de calor en forma de vapor de agua, por lo tanto el calor necesario para el calentamiento de este material se calcula por la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = m_g \cdot Cp_g \cdot (T_f - T_i) \quad (2.40)$$

Donde:

$m_g$ : masa del cemento asfáltico, (kg).

$Cp_g$ : capacidad calórica del cemento asfáltico, (kJ/kg·K).

Para el cálculo de las pérdidas energéticas en el calentador de cemento asfáltico se tiene en cuenta las pérdidas por convección libre y por radiación hacia el medio exterior, por lo tanto se emplea la misma metodología que se utiliza para el cálculo del calor perdido en el reactor variando las dimensiones del equipo y sus propiedades termofísicas.

Primeramente, para establecer las dimensiones del equipo es necesario determinar su volumen a partir de la cantidad de cemento asfáltico a consumir para una producción de 3434,40kg/lote de impermeabilizante según la propuesta. Empleando la densidad del

cemento asfáltico se obtiene el volumen necesario y se diseña un tanque para satisfacer la producción de un día; además, se propone un sobrediseño del tanque de un 10%, por lo tanto:

$$V_{Calentador} = 2 \cdot (m_9 / \rho_{cemento\_asfáltico}) \quad (2.41)$$

$$V_{Total\_Calentador} = V_{Calentador} / 0,9 \quad (2.42)$$

Una vez calculado el volumen total del calentador de cemento asfáltico se calcula la altura del cilindro ( $h_{cil}$ ) a partir de las ecuaciones del volumen de cilindro y cono truncado. Para ello se fijan los diámetros del cilindro ( $d_1=1,2m$ ) y del cono truncado ( $d_1=1,2m$  y  $d_2=0,1715$ ) así como la altura del cono truncado ( $h_{ct}=0,5936$ ),

$$V_{Total\_Calentador} = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \cdot h_{cil} + \frac{\pi}{12} \cdot h_{ct} \cdot (d_1^2 + d_2^2 + d_1 \cdot d_2) \quad (2.43)$$

Las propiedades termofísicas se obtienen a partir de la temperatura media de la película ( $T_f$ ) igualmente expuestas en el epígrafe anterior, una vez calculado el calor perdido ( $Q_{perd}$ ) por la ecuación 2.24 es necesario determinar el tiempo de permanencia o el tiempo necesario para que el cemento asfáltico alcance la temperatura requerida y se fusione. Para tal fin, se propone emplear un método iterativo, primeramente se determina para una hora de calentamiento el calor perdido ( $Q_{perd}$ ) en unidades de kJ y el calor cedido ( $Q_{ced}$ ), según la ecuación 2.37. Posteriormente se determina la variación de la temperatura con respecto al tiempo para obtener el tiempo necesario que requiere el producto para alcanzar la temperatura establecida a partir del calor absorbido ( $Q_{abs}$ ) por dicho material, esta relación puede plantearse como se muestra seguidamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{ced} - Q_{perd}}{m_9 \cdot Cp_9} \quad (2.44)$$

Para el desarrollo de dicha ecuación se emplea igualmente el método de Runge-Kutta según la ecuación 2.23 y una vez realizada todas las iteraciones necesarias se obtiene el tiempo que se demora en calentar el cemento asfáltico y se procede a calcular el calor cedido ( $Q_{ced}$ ), el % de pérdidas de calor ( $\%Pérd$ ) y el flujo necesario de vapor de agua ( $m_{vapor}$ ) para el calentamiento del calentador cemento asfáltico según las ecuaciones 2.37, 2.38, 2.39.

#### **2.4.3 Balance de energía en el mezclador de jabón insoluble, cemento asfáltico y goma reciclada:**

En este equipo es necesario que la mezcla alcance una temperatura de 120°C para lograr un mezclado homogéneo de los diferentes materiales que se emplean para producir el impermeabilizante, donde se conoce que el jabón insoluble sale del reactor a una temperatura de 100°C y el cemento asfáltico sale del calentador a 110°C, mientras que la goma reciclada se encuentra a temperatura ambiente (25°C); por lo tanto se necesita suministrar una fuente de calor en forma de vapor de agua para el calentamiento; y el calor necesario se calcula por la siguiente ecuación:

$$Q_{abs\_1} = (m_6 \cdot Cp_6) \cdot (T_f - T_i) + (m_9 \cdot Cp_9) \cdot (T_f - T_i) + (m_{10} \cdot Cp_{10}) \cdot (T_f - T_i) \quad (2.45)$$

Donde:

$m_6$ : masa de jabón insoluble, (kg).

$m_{10}$ : masa de cemento asfáltico, (kg).

$m_{10}$ : masa de polvo de goma reciclada, (kg).

$(T_f - T_i)$ : Temperatura final e inicial referida a cada producto, (K).

$C_{p6}$ : capacidad calórica del jabón insoluble, (kJ/kg·K).

$C_{p9}$ : capacidad calórica de cemento asfáltico, (kJ/kg·K).

$C_{p10}$ : capacidad calórica de la goma reciclada, (kJ/kg·K).

Además se determina el calor absorbido necesario para mantener la temperatura constante durante el tiempo de mezclado de las sustancias, el coeficiente global de transferencia de calor y el tiempo en alcanzar la temperatura requerida; para ello se emplea la misma metodología descrita en el epígrafe 2.4.1. Además para el cálculo de las pérdidas energéticas en este equipo se emplea la misma metodología que se utiliza para el cálculo del calor perdido en el reactor y el calentador variando las dimensiones del equipo y sus propiedades termofísicas, e implementando estas dos técnicas se obtiene el flujo de vapor necesario para este equipo.

## **2.5 Metodología empleada para determinar la factibilidad económica de la planta propuesta.**

En este epígrafe se describe la metodología a seguir para el desarrollo del análisis económico de la planta propuesta de producción del impermeabilizante, para ello se emplean diversas ecuaciones para determinar los diferentes indicadores económicos de la



producción y los indicadores para evaluar la eficiencia económica de la producción para la planta propuesta.

Primeramente se determina la inversión inicial a partir del software CAPCOST tomando como base los resultados del diseño de equipos realizado así como para estimar el costo de adquisición de los equipos. Este cálculo fue realizado para el año 2004 con un Índice de costo de 444.2 que es el valor límite para el programa empleado CAPCOST. El valor de  $C_{GR}$  obtenido se actualiza para el año 2012 con un Índice de Costo de 584,6 que es el último disponible. A continuación se exponen los pasos para desarrollar el análisis económico siguiendo la metodología de Turton, (1998):

### **2.5.1 Cálculo de la inversión o capital total invertido.**

Para determinar la inversión o el capital total invertido se emplea la siguiente ecuación:

$$Capital.total.invertido = Capital.fijo + Capital.circulante \quad (2.46)$$

Dónde:

*Capital Fijo*: Es el  $C_{GR}$  obtenido en el CAPCOST (\$).

*Capital de trabajo o circulante*: Es el 15 - 20% del Capital fijo, según Turton, (1998). Es la cantidad de dinero dentro de la inversión, corresponde para pagar salario, materias primas entre otros. No se amortiza, ese valor se recupera en el último año de la vida útil de la empresa.

## **2.5.2 Cálculo de los indicadores económicos de la producción.**

Para determinar los indicadores económicos de la producción se calculan una serie de indicadores como son: el costo de producción, la ganancia, la rentabilidad, la estructura de costo y el punto de equilibrio. Estos indicadores han sido planteados por Brizuela, (1987), Peters y Timmerhaus, (1991) y Turton, (1998).

### **2.5.2.1 Determinación del Costo de Producción.**

Para determinar el costo de producción se utiliza el método de estimación del costo de manufactura según plantea Turton, (1998) que consiste en calcular cinco elementos del costo y el resto de los elementos del costo se estiman a partir de estos cinco elementos. El costo de producción ( $CP = COM$ ) representa lo que va a costar mantener la planta en funcionamiento. Los cinco elementos que se calculan se muestran a continuación:

- Capital fijo invertido ( $FCI$  o  $C_{GR}$ ).
- Costo de mano de obra ( $C_{OL}$ ).
- Costo de utilidades ( $C_{UT}$ ).
- Costo del tratamiento de residuales ( $C_{WT}$ ).
- Costo de materia prima ( $C_{RM}$ ).

El capital fijo invertido ( $FCI$  o  $C_{GR}$ ) se obtiene a partir del cálculo en el CAPCOST.

Para determinar el costo de mano de obra ( $C_{OL}$ ) se utiliza la tabla 3.3 del Turton (cantidad de operadores por turno que se necesitan para los distintos equipos) y a partir de ello se elabora la tabla para este caso de estudio.

El costo de utilidades ( $C_{UT}$ ) corresponde al vapor producido (que se consume en el reactor, el calentador y en el mezclador) así como el consumo de combustible (en el generador de vapor). Los precios estimados para el 2013 se muestran en la siguiente tabla, proporcionados por el departamento económico de la planta piloto donde se produce actualmente el impermeabilizante de MAP.

*Tabla 2.4 Precio de utilidades (\$/kg).*

<i>Utilidades</i>	<i>Precio</i>
Vapor	3,35
Combustible	1,05

El costo del tratamiento de residuales ( $C_{WT}$ ) es nulo porque no se va a tener ninguna planta de tratamiento de residuales, este costo está incluido en el módulo simple.

El costo de materia prima ( $C_{RM}$ ) se conoce a partir de los datos proporcionados por la planta piloto donde se produce el mástique asfáltico semisólido con polímero de goma según los diferentes proveedores de las materias primas.

*Tabla 2.5 Precio de las materias primas.*

<i>Materias primas</i>	<i>Precio</i>
Residual de policosanol [\$/kg]	5,00
Aceite usado [\$/kg]	1,21
Cemento asfáltico [\$/kg]	0,30

Goma reciclada [\$/kg]	-
Cemento P-350 [\$/kg]	0,22
Agua	0,03

El resto de los costos se estiman de los cinco costos ya calculados teniendo en cuenta la siguiente tabla propuesta por Turton, (1998).

*Tabla 2.6 Factores para estimar el costo de producción o de manufactura (COM).*

<i>1 - Costos directos de operación</i>		
	<i>Descripción</i>	<i>Costos</i>
A	Materia prima	$C_{RM}$
B	Residuales	$C_{WT}$
C	Utilidades	$C_{UT}$
D	Mano de obra	$C_{OL}$
E	Supervisión	$0,18 \cdot C_{OL}$
F	Mantenimiento	$0,06 \cdot FCI$
G	Suplementos operacionales	$0,009 \cdot FCI$
H	Laboratorio	$0,15 C_{OL}$
I	Patentes y marcas	$0,03 \cdot COM$
<i>2- Costos fijos de operación</i>		
A	Depreciación	$0,1 \cdot FCI$
B	Impuestos y seguros	$0,032 \cdot FCI$
C	Sobrecargos	$0,708 C_{OL} + 0,036 FCI$
<i>3- Costos generales de producción</i>		

A	Costos de administración	$0,177 \cdot C_{OL} + 0,09 \cdot FCI$
B	Costos de distribución y ventas	$0,11 \cdot COM$
C	Investigación y desarrollo	$0,05 \cdot COM$

Como se puede observar para calcular el costo de manufactura (COM) previamente es necesario obtener todos los costos, pero algunos de ellos dependen del COM. Por lo tanto, según plantea la bibliografía a partir de una suma algebraica de todas las ecuaciones expuestas en la tabla anterior se puede llegar a la ecuación siguiente (Turton, 1998). Una vez obtenido el COM se calculan todos los costos que dependen de él.

$$COM = 0,304 \cdot FCI + 2,73 \cdot C_{OL} + 1,23 \cdot (C_{UT} + C_{WT} + C_{RM}) \quad (2.47)$$

### 2.5.2.2 Cálculo del Valor de la Producción.

Este término indica el valor económico de la producción, conocido también como ingresos, \$/año, \$/día, etc. El valor de la producción depende del número de unidades producidas o volumen de producción y del valor unitario del producto conocido también como precio unitario del producto.

$$VP = pup \cdot N \quad (2.48)$$

Dónde:

*pup*: precio unitario del producto (\$/kg).

*N*: volumen de producción (kg/año).

### 2.5.2.3 Cálculo de la Ganancia.

Desde un punto de vista matemático la ganancia económica de la producción viene dada por la diferencia entre el valor de producción y el costo de producción (Brizuela, 1987).

$$G = VP - CP \quad (2.49)$$

### 2.5.2.4 Determinación de la Rentabilidad.

La rentabilidad indica la eficiencia económica de un proceso hasta el nivel adecuado, pero no basta con que la ganancia sea positiva, sino que la misma debe superar cierto valor fijado por el indicador ramal para la ganancia de manera que represente un porcentaje determinado y adecuado del costo de producción para esa rama.

$$Rn = \frac{G}{CP} \quad (2.50)$$

### 2.5.2.6 Estructura de costo.

Este término permite determinar los costos que tienen mayor incidencia sobre el costo total de producción.

$$\% Costo = \frac{C_i}{CP_T} \cdot 100 \quad (2.51)$$

Dónde:

$C_i$ : Costo de cada elemento (\$/año).

*CP<sub>T</sub>*: Costo producción total (\$/año).

### **2.5.2.7 Punto de equilibrio.**

El punto de equilibrio permite obtener o conocer el volumen de producción a partir del cual la empresa comienza a tener ganancia, este se puede obtener gráficamente o calcularlo mediante la siguiente expresión; en dependencia de los datos que se dispongan.

$$No = \frac{CF}{pup - cuv} \quad (2.52)$$

Donde:

*CF*: Corresponde a los costos fijos de la producción (\$/año).

*cuv*: Se refiere al costo unitario variable y se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$cuv = \frac{CV}{N} \quad (2.53)$$

Donde:

*CV*: Corresponde a los costos variables de la producción (\$/año).

### **2.5.2.8 Costo por peso:**

Este indicador es uno de los más empleados para definir la eficiencia económica de una gestión productiva, y por tanto aparece en la totalidad de los informes económicos, es la

relación que existe entre el costo de producción y el valor de la producción, es por tanto el costo de cada unidad de valor de la producción. Este valor obtenido debe ser menor que uno para que la producción sea económicamente factible.

$$\text{Costo / peso} = \frac{CP}{VP} \quad (2.54)$$

### **2.5.3 Indicadores para evaluar la eficiencia económica de un proyecto.**

Dentro de los indicadores para evaluar la eficiencia económica de un proyecto se encuentra el retorno de la inversión, el plazo de recuperación de la inversión, el costo por peso, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), para ello se emplean las ecuaciones que se muestran a continuación.

#### **2.5.3.1 Retorno de la inversión.**

El retorno de la inversión ofrece una medida sobre la cantidad en porcentaje que retorna la inversión a través de la ganancia cada año.

$$\% \text{ Retorno} = \frac{G}{I} \cdot 100 \quad (2.55)$$

Dónde:

*I*: inversión o capital fijo invertido (\$).



### 2.5.3.2 Plazo de recuperación de la inversión.

Este es un indicador que expresa el tiempo que tardamos en recuperar la inversión si se destinara toda la ganancia a reponer la inversión para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$PRI = \frac{I}{G + A} \quad (2.56)$$

### 2.5.3.3 Cálculo del Valor Actual Neto (VAN).

Es la suma de los valores actualizados de todos los flujos netos de caja que se esperan en el proyecto, deduciendo el valor de la inversión inicial. Para ello se elabora la tabla de flujo de caja para un interés fijado y el tiempo de vida útil de la planta.

Un proyecto de inversión será viable si el VAN es mayor que cero, es decir, tiene que ser positivo y entre varias alternativas se escoge el mayor posible. Para el desarrollo de cada uno de los términos que se incluyen en la tabla de flujo de caja se emplean las siguientes ecuaciones:

Primeramente se determina el movimiento de fondos a partir de la siguiente expresión donde en el año cero el movimiento de fondos es negativo pero a partir del primer año toma valores positivos.

$$Mf = Total.de.cobros - Total.de.pagos \quad (2.57)$$

Donde:

*Total de cobros:* se refiere al valor de la producción; donde en el año 0 no hay cobros totales y a partir del primer año hasta el último año los cobros totales corresponden al valor de la producción.

*Total de pagos:* se refiere al costo de producción; donde en el año 0 el total de pagos corresponde al valor de la inversión y a partir del 1er año hasta el último corresponde al costo de producción.

Además se determina el movimiento de fondos acumulados el cual se calcula sumando los movimientos de fondo hasta el año en cuestión.

El movimiento de fondos actualizado se calcula a partir del movimiento de fondos, multiplicando cada valor por el factor de actualización correspondiente a cada año según las siguientes expresiones:

$$Mf_{actualizado} = Mf \cdot factor_{actualización} \quad (2.58)$$

$$factor_{actualización} = \frac{1}{(1+i)^t} \quad (2.59)$$

Donde:

*i:* Interés fijado (%)

*t:* Corresponde al año que se esté analizando (año).

Además, a partir la sumatoria del movimiento de fondos actualizados se obtiene el VAN según se muestra a continuación:

$$\sum Mf_{actualizado} = VAN \quad (2.60)$$

O empleando también la siguiente expresión:

$$VAN (+) = S_0 + \sum \frac{S_n}{(1+i)^n} \quad (2.61)$$

Dónde:

$S_0$ : Movimiento de fondo para el año 0 (\$).

$S_n$ : Movimiento de fondos para cada año (\$)

$i$ : Interés fijado (%)

$n$ : Corresponde al año que se esté analizando (año).

#### 2.5.3.4 Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).

La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad de una inversión, está definida como la tasa de interés con la cual el Valor Actual Neto (VAN) de una inversión sea igual a cero.

$$TIR = i_1 - \frac{VAN (+) \cdot (i_1 - i_2)}{VAN (+) - VAN (-)} \quad (2.62)$$

Donde:

$VAN (+)$ : Valor actual neto positivo (\$).

$VAN (-)$ : Valor actual neto negativo (\$).

$I_1$ : Interés para el cual el VAN es positivo (\$).

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

## **2.6 Conclusiones parciales del capítulo**

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se expone la demanda en la provincia de Matanzas de edificaciones que necesitan ser impermeabilizadas dado el grado de deterioro de las mismas de acuerdo a los datos proporcionados por Vivienda Provincial y se determina la capacidad productiva de la planta propuesta para satisfacer dicha demanda.
2. Se muestra la propuesta del diseño de planta para la producción de mástique asfáltico semisólido con polímero de goma, así como las características de las materias primas que se emplean para su producción.
3. Se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del escalado de los equipos con el objetivo de obtener los equipos a escala industrial (prototipo) semejante geométricamente al equipo empleado actualmente por la planta piloto (modelo), además de cumplir con el criterio de escalado seleccionado.
4. A partir del balance energético propuesto a los equipos que necesitan calentamiento específicamente para el reactor, el tanque de calentamiento de cemento asfáltico y el mezclador se determina la energía térmica y el flujo de vapor necesario.
5. Para el desarrollo del análisis económico de la planta propuesta se describe una metodología que permite determinar los diferentes indicadores económicos de la

producción, así como otros indicadores que permiten evaluar su eficiencia económica.

## CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior para realizar la propuesta de diseño de la planta de impermeabilizante de cubierta. Primeramente se obtiene la cantidad de materiales necesarios para satisfacer la demanda propuesta. Por otro lado se presentan los resultados del escalado para los equipos propuestos (reactor y mezclador) a un nivel industrial. Además a partir del balance de energía a dicho proceso se obtiene el flujo de vapor necesario para satisfacer la demanda propuesta y se realiza un análisis económico que permite determinar la factibilidad económica de la planta propuesta. Además para la realización de los cálculos se emplea una hoja de cálculo de Microsoft Excel, lo cual permite modificar estos valores para otras condiciones de producción.

### 3.1 Resultados de la propuesta a escala industrial de la cantidad de materiales necesarios para satisfacer la demanda propuesta.

A partir de las cantidades de materiales que se tiene para la producción a escala de planta piloto se puede determinar dichas cantidades a escala industrial del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma; para ello se necesitan las siguientes cantidades de materiales:

*Tabla 3.1 Cantidades de materiales para la propuesta de producción a escala industrial del mástique asfáltico semisólido con polímero de goma.*

<i>Materiales</i>	<i>Masa [kg]</i>	<i>Volumen [m<sup>3</sup>]</i>
Residual policosanol	302,23	0,32

Cemento	41,21	0,013
Agua	78,99	0,079
Lechada de cemento	120,20	0,092
Aceite	1373,76	1,68
Jabón insoluble	1717,20	2,02
Agua evaporada	78,99	-
Cemento asfáltico	1167,70	1,11
Goma	549,50	0,58
Mástique semisólido	3434,40	3,71

Los resultados anteriores plasman las cantidades de materiales que se necesitan para satisfacer la demanda propuesta de 3434,40kg/lote de impermeabilizante de cubierta y con estos valores se pudo determinar el volumen que representa cada material para utilizarlo posteriormente en el escalado de los equipos y el balance energético.

### **3.2 Resultados del escalado del reactor y el mezclador.**

A partir de los datos reales desde el punto de vista geométrico del reactor enchaquetado donde se produce algunos de los materiales a escala de planta piloto (modelo) del impermeabilizante se puede obtener el escalado del reactor y mezclador a escala industrial (prototipo), así como, se cuenta con el volumen necesario de cada producto según las cantidades de materiales propuestas en el epígrafe anterior. Por lo tanto, los resultados del escalado del reactor para un volumen de producto de 2,02m<sup>3</sup> y el mezclador con un volumen de 3,71m<sup>3</sup> se muestran a continuación:

Tabla 3.2 Resultados del escalado geométrico de los prototipos (reactor y mezclador).

<i>Dimensiones</i>	<i>reactor</i>	<i>mezclador</i>
Dint	1,3851	1,6962
Hliq-cil	1,1159	1,3666
Da	0,4353	0,5331
Dext	1,6489	2,0193
Hcamisa	1,8402	2,2536
Hf	0,5936	0,7270
Df	0,1715	0,2100
Ht	0,2506	0,3069
E	0,1319	0,1615
Ho	0,2638	0,3231
Lp	0,2111	0,2585
Hp	0,1055	0,1292
Dbm	0,3430	0,4200
E cam	0,1319	0,1615
Ha	2,1106	2,5847
Ep	0,0198	0,0242
Dt	0,3957	0,4846
Hcil	1,3785	1,6881
Htotal equipo	2,22	2,72

A partir de los resultados del escalado geométrico se obtiene el factor de escala lineal para el reactor y el mezclador los cuales se cumplen para todas las dimensiones escaladas, siendo estos valores de 1,32 y 1,61 respectivamente. Estos factores de escala



se considera pequeño según González, (2000) y Neuman, (2008) dado que los factores de escala geométrico (lineales) deben estar entre un rango de 5 y 15 pero no obstante en la práctica se pueden encontrar factores que estén fuera del rango establecido y para este caso de estudio según la demanda obtenida solamente se necesita un pequeño incremento de la capacidad. A continuación se muestran otros resultados del escalado pero desde el punto de vista volumétrico:

*Tabla 3.3 Resultados del escalado volumétrico de los prototipos (reactor y mezclador).*

<i>Resultados</i>	<i>reactor</i>	<i>mezclador</i>
Vproducto	2,02	3,71
Vliq-cil	1,68	3,09
Vcono	0,34	0,62
Vcil	2,08	3,81
Vtotal	2,41	4,44

Con estos resultados también se puede obtener el factor de escala volumétrico de cada equipo escalado (reactor y mezclador) el cual se incrementan en 2,29 y 4,22 respectivamente el prototipo con respecto al modelo.

Además a partir del criterio de escalado seleccionado se obtienen los siguientes resultados:

*Tabla 3.4 Resultados del escalado según el criterio de escalado para los prototipos (reactor y mezclador).*

<i>Parámetros</i>	<i>reactor</i>	<i>mezclador</i>
-------------------	----------------	------------------

Potencia del agitador (kW)	2,39	4,38
Velocidad del agitador (rpm)	64,85	56,65

A partir de los resultados obtenidos luego del criterio de escalado se obtiene la potencia de los agitadores y sus velocidades de agitación señalando que el mezclador presenta una mayor potencia con respecto al reactor debido a que tiene un mayor volumen, además de que el material a mezclar presenta una mayor viscosidad debido a la adición un producto como la goma, mientras que la velocidad del agitador ocurre lo contrario dado que al tener un volumen superior su velocidad de rotación disminuye.

### 3.2 Resultados del balance energético en el reactor, el calentador y el mezclador.

A continuación se muestra los resultados del balance energético realizado a los equipos de la planta propuesta con el objetivo de obtener el vapor necesario para la obtención del impermeabilizante de cubierta.

*Tabla 3.5 Resultados para obtener el calor perdido de los diferentes equipos: reactor, calentador y mezclador.*

<i>Parámetros</i>	<i>reactor</i>	<i>calentador</i>	<i>mezclador</i>
<i>Q perd conv</i>	2453,81	2940,93	3633,78
<i>Q rad</i>	1450,23	1749,87	2174,26
<i>Qperd total (W)</i>	3904,04	4690,80	5808,04

Una vez obtenido el calor perdido total que se encuentra en las unidades de medida (W) se procede a calcular el tiempo que demora hasta alcanzar la temperatura requerida de los

materiales en cada uno de estos equipos a partir del método matemático Runge-Kutta de cuarto orden, descrito en el capítulo anterior, (ver Anexo 8), para realizar la conversión de unidades a kJ, y posteriormente se procede a determinar cada uno de los siguientes parámetros que se muestran a continuación en la tabla siguiente:

*Tabla 3.6 Resultados del balance energético para los diferentes equipos: reactor, calentador y mezclador.*

<i>Parámetros</i>	<i>reactor</i>	<i>calentador</i>	<i>mezclador</i>
<i>Q<sub>abs</sub> (kJ)</i>	799244,59	427308,14	390450,92
<i>Q<sub>ced</sub> (kJ)</i>	813299,14	451283,79	411359,85
<i>Q<sub>perd</sub> (kJ)</i>	14054,54	24317,12	20908,94
<i>% perd</i>	1,73	5,38	5,08
<i>m vapor (kg/h)</i>	152,25	144,25	277,11

Finalmente, en la tabla anterior se muestran los resultados del balance energético destacando en los equipos analizados y se obtienen los consumos necesarios de vapor requeridos en los diferentes equipos para el desarrollo del proceso de producción de impermeabilizante señalando que el reactor presenta un mayor consumo de vapor debido a que todos sus materiales se introducen al equipo a temperatura ambiente por lo cual existe un mayor consumo de calor por este equipo; por lo tanto se necesita además para los equipos propuestos que necesitan calentamiento un generador de vapor que genere aproximadamente 574kg/h de vapor, que puede ser generado a partir de una caldera de tipo pirotubular dado que se considera un flujo de vapor pequeño según plantea Borroto y Rubio, (2010). Además en la planta piloto donde se produce actualmente el

impermeabilizante está instalado un generador de vapor de este tipo por lo que sirve como base para un futuro diseño de este equipo, pero no forma parte de esta investigación.

### **3.3 Propuesta del material de construcción, dimensionado de los equipos y equipos auxiliares de la planta.**

Según el material empleado para la construcción de los equipos de la planta piloto, para la construcción de los equipos que conformaran la planta industrial que aquí se propone se recomienda emplear los mismos materiales; es decir, materiales de acero CT3 de bajo contenido de carbono, conocido según la norma AISI 1023. En este tipo de acero está presente el Carbono y los elementos residuales, como el Manganeso, Silicio, Fósforo y Azufre, en cantidades consideradas como normales; además presenta como características una buena ductilidad y homogeneidad, un valor elevado de la resistencia mecánica y excelente soldabilidad así como un bajo coste. Como material de aislamiento se propone la lana de roca debido a que es un producto especialmente indicado para los aislamientos térmicos en la industria, además de presentar un bajo precio, su conductividad térmica y disponibilidad de los diferentes tipos de aislantes, según indica Rockwool, (2012); siendo además de fácil adquisición y se emplea actualmente en la planta. Para los tanques de almacenamiento y mezclado se propone las siguientes dimensiones con el objetivo de satisfacer la demanda propuesta:

*Tabla 3.7 Propuesta de dimensiones de tanques de almacenamiento y mezclado.*

Equipos	Diámetro (m)	Longitud/Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
---------	-----------------	------------------------	------------------------------

Tanque (horizontal) dosificador de aceite	1,2	1,5	1,696
Tanque (vertical) almacenamiento de aceite	1,8	3,5	8,906
Tanque (vertical) mezclador de lechada de cemento	0,5	0,8	0,157

Para el almacenamiento de aceite usado se necesita para garantizar la producción de cinco días de trabajo un volumen de  $16,96\text{m}^3$  por lo tanto se propone dos tanques. Para el caso del almacenamiento de cemento asfáltico para garantizar la producción de cinco días de trabajo se necesita un volumen de  $11,1\text{m}^3$  por lo tanto se propone según tesis (Travieso, 2015) dos tanques horizontal de  $7\text{m}^3$  cada uno, donde se necesita un flujo de vapor de  $206\text{kg/h}$ .

Por otro lado, se recomiendan utilizar para la planta propuesta bombas centrífugas dado que pueden bombear líquidos limpios o sucios, además de suspensiones y son muy versátiles, según plantea Rosabal y Garcell, (2006) y también actualmente la planta piloto opera con ese tipo de bombas. Para el transporte del cemento asfáltico se recomienda una bomba rotatoria de engrane dado que este tipo de bombas pueden manejar líquidos muy viscosos según indica Rosabal y Garcell, (2006), como es el caso de esta sustancia.

### **3.4 Resultados del análisis económico.**

A continuación se muestran los diferentes resultados del análisis económico; para ello se emplearon diferentes funciones de Excel así como el software CAPCOST. Primeramente se determina la inversión total de la planta a partir de los resultados obtenidos por el programa CAPCOST que se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 3.7 Resultados obtenidos por el CAPCOST.*

Parámetros	Valor
Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)	444,2
Total Purchased Equipment Cost [\$]	782 000
Total bare Module Cost (CS and 0 barg) of Plants [\$]	1 723 000
Total bare Module Cost of Plants [\$]	1 725 000
Total Module Cost of Plants [\$]	2 036 000
Total Grass Roots Cost of Plants ( $C_{GR}$ ) [\$]	2 639 000
$C_{GR}$ para el año 2016 [\$]	3 218 249, 21

El valor de la inversión está influenciado generalmente por el costo de los tanques y este cálculo fue realizado para el año 2004 con un índice de costo de 444,2 que es el valor límite para el programa empleado CAPCOST; por lo tanto, se actualiza el valor de  $C_{GR}$  para el año 2016 con un índice de costo de 541,7 que es el último índice de costo disponible.

Por otro lado el capital de trabajo o circulante es de \$563 193,61 y el capital total invertido = \$3 781 442,82.

Para obtener el costo de mano de obra ( $C_{OL}$ ) se emplea la tabla 3.3 del Turton para obtener la cantidad de operadores por turno que se necesitan para los distintos equipos; para ello se elabora la siguiente tabla para este caso de estudio. El salario promedio es de 600 \$/mes para cada operador.

*Tabla 3.8 Operadores por equipo.*

<i>Equipo</i>	<i>Operadores por turno</i>	<i>Número de equipos</i>	<i>Operadores por turno</i>
Intercambiadores de calor	0,1	2	0,2
Tanques	0	5	0
Bombas	0	5	0
Reactores	0,5	1	0,5
Total			0,7

Por lo tanto el número de operadores que se requiere por turno es de 0,7.

Por otro lado un operador trabaja 49 semanas/año · 5 turnos /semana = 245 turnos por operador/año.

La planta trabaja 245 días /año · 1turnos/día = 245 turnos/año

El número de operadores que deben emplearse para proporcionar este número de turnos es: 245 turnos/año / 245 turnos por operador/año = 1. Esto no incluye los supervisores.

Teniendo en cuenta que la planta trabaja 245 días al año, que se necesita un turno que trabaje 8 horas y que estos trabajadores tienen vacaciones; el número de operadores por turno obtenidos por la tabla anterior se multiplica por uno para obtener el número de operadores reales necesarios obteniéndose 0,7 pero se considera que debe haber 2 operadores en total, además tomando como salario promedio de \$600,00/mes para cada operador, el salario anual es de \$7200,00 y para los 2 operadores el costo de mano de obra (COL) es de \$14400,00.

A continuación se exponen los resultados de los indicadores del costo de producción según la metodología empleada.

*Tabla 3.9 Resultados de los costos directos de operación (\$/año)*

<i>Costos</i>	<i>Valor</i>
FCI = C <sub>GR</sub>	3 218 249, 21
C <sub>OL</sub>	14 400
C <sub>UT</sub>	3 860 645,80
C <sub>WT</sub>	0
C <sub>RM</sub>	1 127 723,77
Costo de supervisores directos	2592
Costo de mantenimiento y reparaciones	193 094,95
Costo de suministros de operación	28 964,24
Cargas de laboratorio	2160
Patentes y Marcas	221 581,04

*Tabla 3.10 Resultados de los costos de producción fijos (\$/año)*

<i>Costos</i>	<i>Resultado</i>
Depreciación	321 824,92
Impuestos y seguros	102 983,97
Sobrecargos de la planta	126 052,17

*Tabla 3.11 Resultados de los costos generales de producción (\$/año)*

<i>Costos</i>	<i>Resultado</i>
---------------	------------------



Costos de administración	31 513,04
Costos de distribución y ventas	812 463,83
Investigación y desarrollo	369 301,74

Por lo tanto el Costo de Producción o COM es de 7 175 252,93\$/año.

Por su parte a continuación exponen los resultados de otros indicadores económicos de la producción:

*Tabla 3.12 Resultados de los costos generales de producción (\$/año).*

<i>Indicadores</i>	<i>Resultado</i>
Valor de la Producción [\$/año]	8 178 680,16
Ganancia [\$/año]	1 003 427,23
Rentabilidad [%]	13,98
Costo por Peso	0,88
Punto de equilibrio [kg/año]	923 853,60

A partir de los resultados anteriores se observa que la planta propuesta obtiene ganancia lo cual es favorable, así como presenta una buena rentabilidad, además el costo por peso indica que por cada peso producido invierte 0,88 y el resultado del punto de equilibrio indica que a partir de un volumen de producción de 923 853,60 kg/año la empresa comienza a obtener ganancia y en la siguiente figura se observa este resultado.

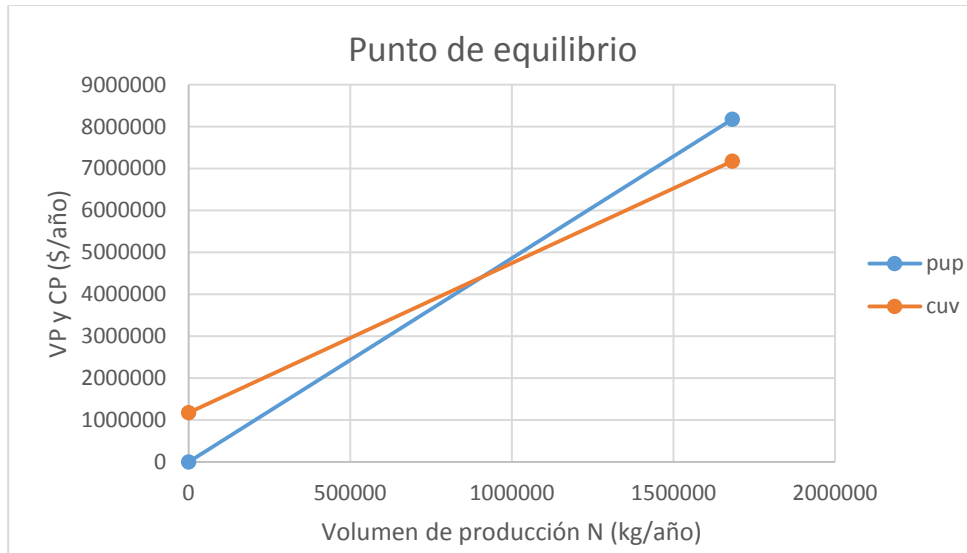


Figura 3.1 Punto de equilibrio [kg/año].

Por otro lado a continuación se muestra el gráfico de estructura de costo de cada uno de los materiales que influyen en el costo de producción:

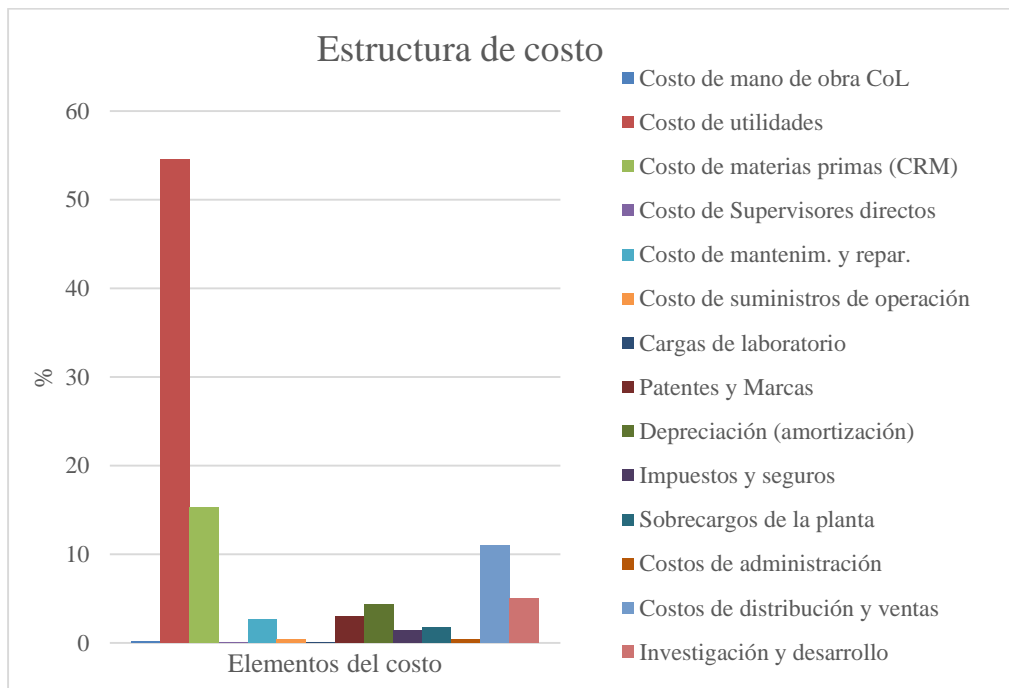


Figura 3.2 Estructura de costo [%].

El gráfico de estructura de costo demuestra que la mayor influencia está dada por los costos de la materia prima demostrando que estos elementos representan los costos más significativos en relación con los costos totales.

A continuación se muestran los resultados de los indicadores para evaluar la eficiencia económica de un proyecto:

*Tabla 3.13 Resultados de los indicadores para evaluar la eficiencia económica del proyecto (\$/año).*

<i>Indicadores</i>	<i>Resultado</i>
% Retorno [%]	41,18
PRI [años]	2,43
VAN [\$]	4 361 657,93
TIR	0,33

El porcentaje de Retorno indica que el 41,18% de la inversión retorna con la ganancia cada año; además la inversión se recupera en 2,43 años lo cual demuestra que el plazo de recuperación de la inversión es aceptable debido a que es menos de la mitad del tiempo de vida útil de la planta. Para determinar el Valor Actual Neto se realiza una tabla de flujo de caja la cual se observa en el Anexo 9. El resultado del VAN indica que es mucho mayor que cero y en el orden de la inversión por tanto una vez que se pague el interés y se reponga la inversión queda una utilidad considerable. La Tasa Interna de Rentabilidad es de un 33 % y es mayor que el interés (10%) demostrando que puede invertirse en la planta. Otro resultado de interés es que la inversión de \$3 781 442,82 es aceptada debido a que se cumplen con todos los indicadores económicos de la producción.

### **3.5 Conclusiones parciales del capítulo**

Una vez finalizado el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se obtiene la cantidad de materiales necesarios para satisfacer la demanda propuesta para la producción de impermeabilizante de cubierta.
2. Se presentan los resultados del escalado para los equipos propuestos: reactor y mezclador a un nivel industrial a partir del reactor que se encuentra a escala planta piloto.
3. Se obtiene la energía térmica y el flujo de vapor necesario para satisfacer la demanda propuesta a partir del balance energético a los equipos que necesitan calentamiento específicamente para el reactor, el tanque de calentamiento de cemento asfáltico y el mezclador.
4. Se realiza una propuesta del material de construcción y las dimensiones de los equipos así como los equipos auxiliares de la planta.
5. Se determina los diferentes indicadores económicos de la producción además de los indicadores para evaluar la eficiencia económica de la producción.

## CONCLUSIONES

Partiendo de los resultados de la presente investigación, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se obtiene la propuesta de diseño de planta para la producción a escala industrial del impermeabilizante para cubierta denominado Mástique Asfáltico con Polímero que utiliza materiales reciclados, con el cual es posible dar respuesta a los problemas de impermeabilización que presentan las edificaciones en la provincia de Matanzas.
2. Se obtienen las principales dimensiones geométricas a partir del método de escalado geométrico para el reactor y el mezclador de la planta que aquí se propone partiendo de una instalación de planta piloto. Durante el escalado se obtienen valores de escala lineal para todas dimensiones escaladas (reactor 1,32 y mezclador 1,61), así como, un factor de escala volumétrico de 2,29 para el reactor y 4,22 para el mezclador. Según el criterio de escalado seguido se obtiene además la potencia de los agitadores y sus velocidades de agitación.
3. Según el análisis energético realizado se hace necesario un flujo de vapor para satisfacer los procesos de calefacción en la planta a escala industrial de 574kg/h, por lo cual, se recomienda utilizar un generador de tipo pirotubular.
4. El análisis económico de la propuesta de planta para la producción de Mástique Asfáltico con Polímero muestra que la misma es factible económicamente de acuerdo a los resultados obtenidos, donde el porcentaje de Retorno de 41,18%

indica que la inversión retorna con la ganancia cada año, la inversión se recupera en 2,43 año, el VAN es \$4 361 657,94 siendo mayor que cero y en el orden de la inversión, así como el TIR alcanza un 33% mayor que el interés, por lo tanto se acepta la inversión de la planta.

5. Por otro lado, los resultados de esta investigación pueden dar respuesta al Proyecto Internacional y al Proyecto Nacional en una segunda etapa y con ello al Programa Nacional de Materiales para la Vivienda.

## RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Realizar el diseño de los equipos desde el punto de vista mecánico para la planta propuesta.
2. A partir de un estudio más exhaustivo a la planta propuesta determinar qué cambios o mejoras se pueden realizar para obtener un proceso más eficiente.
3. Realizar la modelación de la planta propuesta empleando un software que permita desarrollar los cálculos dado que los materiales reciclados utilizados para la producción del Mástique Asfáltico con Polímero son sustancias compuestas.
4. Realizar una evaluación de riesgos por HAZOP de la planta propuesta para identificar, evaluar y prevenir el riesgo potencial así como los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico.
5. Incluir los principales resultados del presente trabajo en el informe final del Proyecto Internacional y Nacional, así como, informar al Programa Nacional de Materiales para la Vivienda de los resultados aquí obtenidos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnus J., *et al.*, 1999. Durabilidad de Mezclas Asfálticas Preparadas con Ligantes Modificados con Polímeros. Comisión de Investigaciones Científicas. LEMIT.
- Aguado L., 2010. “*Reciclado de neumáticos para la fabricación de láminas impermeabilizantes en la construcción*”. Tesis en opción al título de Máster en Técnicas y Sistemas de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Alba et al., 2013. “Mejora del proceso en el control de la calidad para el diseño de los sistemas de impermeabilización en las edificaciones”. *Revista de arquitectura e ingeniería*, Vol 7 (2), ISSN 1990-8830.
- Alba, R. C. y Cruz, J. J., 2012. *Los sistemas de impermeabilización y su análisis sobre la gestión de la calidad para el control en el proceso de diseño*, Monografía, Universidad de Matanzas, Cuba.
- Annamalai, K.; Puri, I.K., 2002. Advanced Thermodynamics Engineering - CRC series in computational mechanics and applied analysis, CRC Press, Boca Ratón, FL (USA), ISBN 0-8493-2553-6.
- Aoyama, T., *et al.* 1997. Patente 5,674,313: Composición resistente al agua, del tipo de asfalto modificado con goma. USA.
- Barón D. A., Zapata L. M., 2012. “*Propuesta de Redistribución de Planta en una empresa del Sector Textil*”. Universidad Icesi, Colombia.



- Bejan A., y Kraus A. D., 2003. Heat Transfer Handbook. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-39015-1.
- Bisio, A. y Kabel R., 1985. *Scale-up of chemical processes*, 1a edición, John Wiley and Sons, Estados Unidos.
- Borroto A. y Rubio A., 2010. “Combustión y generación de vapor”. Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba. ISBN 978-959-07-1131-2.
- Botasso G., *et al.*, 2008. Utilización de caucho de neumáticos en mezcla asfáltica densa en obras de infraestructura. Universidad de Costa Rica. *Infraestructura vial*, (20), pp 4-12.
- Brizuela, E., 1987. “Aspectos Fundamentales del Diseño de Plantas Industriales ”. Tomo I y II, Editorial ISPJAE, La Habana, Cuba.
- Bueno E. *et al.*, 1990. Economía de la empresa. Análisis de las decisiones empresariales. Pirámide (ed.).
- Buras, P., *et al.* 2004. Patente 20040249024: Agente dispersante y método para la entrega del agente de cadena transversal a la composición de asfalto modificada con polímero. (Patente de aplicación). USA.
- Cahill, P. J., *et al.*, 2002. Patente 200201177663: Materiales compuestos para polines de ferrocarriles y otros productos. (Patente de aplicación). USA.
- Castellanos J. *et al.*, 2001. Balances de masa y energía: métodos clásicos y técnicas no convencionales. Editorial Feijóo, ISBN: 959-250-014-2.

- Castro, G., 2007. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A.
- Coker, A.K. 2001. Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design. Texas: Gulf Publishing Company.
- Cruz, J. J., 2010. “Sistemas de Impermeabilización para Edificios”. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, Vol. 4 (3).
- Cruz L. y Pons A., 1985. Introducción a la Ingeniería Química. Tomo II. Ediciones ENPES.
- Cuattrocchio A. C., *et al.*, 2006. El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP) PROCQMA - Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 950-42-0056-7
- Domínguez, F. J., 2009. Materiales elaborados para el curso de posgrado: Escalado de Procesos. Universidad de Matanzas.
- Echeverría, M., *et al.* 2005. “Utilización de goma reciclada en la producción de mástiques asfálticos: Aplicaciones”. *VIII Congreso Internacional de Reciclaje*. Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.
- Echeverría, M., *et al.* 2006. “Goma reciclada en recubrimientos anticorrosivos y de la construcción”. *IX Congreso Internacional de Reciclaje*. Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.

- Echeverría, M., *et al.* 2007. Estudio y evaluación de materiales compuestos de matriz asfáltica modificado con polímeros (MAP) para su aplicación como recubrimientos anticorrosivos. Monografías. Universidad de Matanzas, Cuba.
- Echeverría, C. A., *et al.* 2008. *Materiales compuestos de matriz asfáltica modificada con polímero de goma para la industria de materiales*, Matanzas: s.n.
- Echeverría, C. A, *et al.* 2011. “Materiales Compuestos de Matriz Asfáltica Modificada con Polímero Goma para la Industria de Materiales”. *I Taller Nacional Producción de Materiales de Construcción. Universidad de las Villas “Marta Abreu”*.
- Echeverría, M., *et al.* 2015. “Spent tyre valorisation: new polymer modified asphalts for steel protection in an aggressive marine environment”. *Royal Society of Chemistry*, 5 pp. 76057–76064, DOI: 10.1039/c5ra06453h.
- Echeverría M., *et al.*, 2017. “Nuevos recubrimientos a partir de materias primas recicladas”. VIII Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas: CIUM 2017. V Taller Internacional de Ingenierías.
- Fernández P., 2013. Ingeniería térmica y de fluidos. Universidad de Cantabria, España.  
<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/index.html>.
- Fuentes M. A., 2015. Concepción de marketing internacional para la importación de membranas asfálticas de origen argentino para edificaciones en el Estado Plurinacional de Bolivia. Escuela de Posgrado de Marketing Internacional. Argentina.

- Gamboa J., 2012. Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificados vs mezcla tradicional. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
- García, L., 2005. Residuales de la producción de policosanol. Matanzas. 120h. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Químicas. Universidad de Girona, España. Universidad de Matanzas, Cuba.
- García G., 2013. Evaluación de la línea de obtención de mástique asfáltico líquido con polímero goma anticorrosiva y de conservación en la Planta Piloto de la Universidad de Matanzas. Tesis en opción al grado de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas, Cuba.
- Guerin T. F., 2008. “Environmental liability and life-cycle management of used lubricating oils”. *Journal of Hazardous Materials*, (160), pp. 256-264, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.029.
- González, R., 2000. Principios Básicos del Escalado. Monografía. Universidad de Matanzas.
- Hernández F., *et al.*, 2002. “Static and dynamic behaviour of recycled type rubber-filled concrete”. *Cement and Concrete Research*, 32, (10), 1587-1596, DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00833-5.
- Hernández F., *et al.*, 2003. “Rubber modified hot-mix asphalt pavement by dry process”. *International Journal of Pavement Engineering*, DOI:10.1080/10298430802169416.

- Hervás L., 2006. Los residuos urbanos y asimilables. Capítulo IX: Los neumáticos fuera de uso. Junta de Andalucía. Comunidad Europea. Fondo Europeo de cohesión.
- Himmelblau D. M., 1997. Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química. 6ta ed. Prentice- Hall Hispanoamericana. ISBN 968-880-802-4.
- Holman J. P., 1999. Heat Transfer. McGraw Hill Book Company, Inc. ISBN 968-26-0649-7
- Incropera F. P. y De Witt D. P., 1999. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th Ed. Mexico: John Wiley and Sons. ISBN 970-17-0170-4.
- Jávita N. C., 2012. “*Diseño de la distribución de la nueva planta en la empresa Maldonado García Maga*”. Universidad Central de Ecuador, Ecuador.
- Jiménez, A., 2003. Diseño de procesos en Ingeniería Química. Editorial Reverté S.A, Barcelona, España. ISBN: 84-29 1-7277-7.
- Jiménez A., 2010. Recogida de aceites usados: responsabilidad por el futuro. El Espirituano, consultado en [<https://alainjd.blogia.com/2010/112402-recogida-de-aceites-usados-responsabilidad-por-el-futuro.php>].
- Kern D. Q., 1999. Process Heat Transfer. McGraw Hill Book Company, Inc. ISBN 968-26- 1040-0.
- Kossen, N., 1996. “Scale-Up”. *Advances in Bioprocesses engineering*: 53-65.
- Kubicky, P. *et al.* 2002. Patente 20020147255: Mezclas de goma. (Patente de aplicación). USA.

- Laurence M., 2005. Patente 20030018106: Aqueous asphalt emulsions containing liquefied or devulcanized recycled rubber (Patente de aplicación). USA.
- Lienhard J. H., 2004. A Heat Transfer Textbook. 3rd ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press. <http://web.mit.edu/lienhard/www/ahtt.html>.
- Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, 2011. VI Congreso del Partido Comunista de Cuba.
- López, Y., 2013. Propuesta y evaluación técnico – económica de un proceso de sacarificación de cáscara de arroz para la producción de etanol. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Especialidad Ingeniería Química. Universidad de Matanzas, Cuba.
- Luis, J. D., 2015. Materiales elaborados para el curso de posgrado: Ingeniería económica. Universidad de Matanzas, Cuba.
- MAPEI, 2017. Sistemas de impermeabilización bajo rasante. [www.mapei.com](http://www.mapei.com)
- Margarites, A., y Zajic, J. E., 1978. “Fluid Mixing Technology”. *Biotechnology and Bioengineering*, 20, 939-1001.
- Mazzotta F. *et al.*, 2017. “Performance evaluation of recycled rubber waterproofing bituminous membranes for concrete bridge decks and other surfaces”. *Construction and Building Materials*, (136), pp. 524-532, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.058.

- Michelfelder R. A., 2015. “Empirical analysis of the generalized consumption asset pricing model: Estimating the cost of capital”. *Journal of Economics and Business*, 80 pp. 37–50, DOI: 10.1016/j.jeconbus.2015.04.001.
- Moncada L., 2013 Diseño de plantas de procesos químicos: intercambiadores de calor. Universidad Nacional de Trujillo. Perú.
- Moran M. J. y Shapiro H. N., 2006. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England. ISBN-13 978-0-470-03037-0.
- Múnera, J. C. *et al.*, 2010. Fabricación y análisis de asfaltos modificados con polímeros. Grupo de investigación en materiales de ingeniería, Escuela de ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Nauman, E.B. 2008. *Chemical Reactor Design, Optimization and Scale up*. 2nd Ed. New Jersey: John Wiley and Sons. ISBN 978-0-470-10525-2.
- Palma M., 2014. *Ciencias Tecnológicas y Agrarias T-I. Handbook*. Editorial ECORFAN, ISBN:978-4509-765-15-8.
- Partanen, J. E., 2005. Patente 20050027046: Emulsiones con goma de neumáticos reciclados y procesos para su obtención. (Patente de aplicación). USA.
- Pérez O. y Rodríguez M., 2001. Escalado de reactores: reactores tipo tanque con agitación. Monografía.
- Pérez F., *et al.*, 2006. “Evaluación de la cohesión de betunes modificados con polvo de neumáticos”. *Materiales de Construcción*. 56, (284), 43-54.

- Perry, R. H., Green, D.W. 2008. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8th Ed. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-049841-5.
- Peters, M. S. y Timmerhaus, K. D., 1991. *Plants Design and Economics for Chemical Engeneering 4th Edition*. Editorial McGraw-Hill International. ISBN 0-07-100871-3.
- Polacco *et al.*, 2015. "A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility". *Advances in Colloid and Interface Science*. (224), pp.72-112, DOI: 10.1016/j.cis.2015.07.010.
- Pradenas P. y Del Campo, F., 2017. "Desarrollo de la impermeabilización: innovación y calidad en la construcción". *EBM Construcción*.
- Ramírez L., 2011. Pavimentos con polímeros reciclados. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniera Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia.
- Ramos D. *et al.*, 2014. "Procedimiento para la evaluación de sistemas de impermeabilización de cubiertas". *Avanzada Científica*, (1). ISSN: 1029:3450.
- Ramos D. *et al.*, 2015. "Utilización del sistema de impermeabilización de cubiertas de enrajonado y soldadura en el municipio de Matanzas". *Arquitectura e Ingeniería*, (9), núm. 2, pp. 1-53, ISSN 1990-8830.
- Reyes, F. y Lizarazo C., 2006. Caracterización dinámica de asfaltos con y sin polímeros. Grupo CECATA. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.



Roca, X., 2005. Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos avanzados en la construcción de edificios industriales. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

Rockwool International S.A, 2012. Aislamiento de equipamientos industriales. Catálogo de la industria. Disponible en: <http://www.rockwool.es/productos+y+soluciones/u/2011.product/1769/edificacion-tecnica/alpharock-e-225>

Rodríguez M., *et al.* 2006. “Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule”. Publicación Técnica 160.

Rosabal, J., Garcell, L., 2006. “Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas”, Tomo I, Pueblo y Educación, ISBN 959-258-982-8.

Ruíz, A.A, 2009. Factores de escala para la producción biotecnológica de etanol carburante. Tesis para optar por el título de Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Ruíz, A.A, Álvarez H., 2011. “Escalamiento de Procesos Químicos y Bioquímicos basado en un Modelo Fenomenológico”. *Información Tecnológica*, 22, (6), pp. 33-52, DOI: 10.4067/S0718-07642011000600005.

Sagaró, R., *et al.*, 2004. “Evaluación y desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica con rellenos cubanos (Primera parte) ”. *Tecnología Química*, 44, (2), pp. 24-36.

- Salamanca G. J., 2007. Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Shu X., y Huang B., 2014. “Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview”. *Construction and Building Materials*, 67, pp. 217–224, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027.
- Sievers, S. et al., 2017. “Fixed capital investment estimation for modular production plants”. *Chemical Engineering Science*, 158, pp. 395–410, DOI: 10.1016/j.ces.2016.09.029.
- Soto S. et al., 2014. “Evaluación de aceites usados cubanos para el uso como combustible”. *Cubasolar*, (50), 01.
- Speight J. G., 2007 “Asphalts”. In: *Petroleum Technology*. Hoboken, NJ (USA): John Wiley & Sons. ISBN 278-0-470-13402-3.
- Talib R., et al., 2015. “Investigating Effective Waterproofing Materials in Preventing Roof Leaking; Initial Comparative Study: Malaysia, U.K”. *Procedia Manufacturing*, (2) pp: 419-427, DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.074.
- Tonda, M., 2006. *Asfaltos modificados con polímeros: Monografía*.
- Totten G. E., et al., 2003. *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing*. ISBN 978-0-803120969.

- Travieso, D., 2015. Diseño de un tanque de almacenamiento de asfalto para la producción de Mástique Asfáltico. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas, Cuba.
- Turton, R. 1998. "Synthesis and Design of Chemical Processes". New Jersey : Prentice Hall, PTR.
- Ulrich, G. D., 1997. "Diseño y Economía de los Procesos Químicos". Mc Graw Hill.
- Unissa S. A. y Hassanpour M., 2017. "Development circumstances of four recycling industries (used motor oil, acidic sludge, plastic wastes and blown bitumen) in the world". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (72), pp. 605-624. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.109.
- Viera R. y Soler S., 1991. Diseño y análisis de reactores químicos. Tomo I. Ediciones ENPES.
- Yll M., 2013. Materiales elaborados para el curso de posgrado: Escalado de Procesos Químicos y Biológicos. Universidad de Matanzas.
- Zlokarnik, M. 2006. Scale up in Chemical Engineering. 2nd Ed. Austria: Wiley-VCH.

## ANEXOS

### Anexo 1: Clasificación del cemento asfáltico.

Tabla A.1.1 Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo a su viscosidad.

<i>Tipo</i>	<i>Viscosidad a 60°C (P)</i>	<i>Clasificación</i>
AC-2.5	250	Blando
AC-20	2000	Medio
AC-40	4000	Duro

Donde se le ha asignado la nomenclatura “AC” que corresponde a “Cemento Asfáltico”.

Tabla A.1.2 Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo a su viscosidad después de su envejecimiento.

<i>Tipo</i>	<i>Viscosidad a 60°C (P)</i>	<i>Clasificación</i>
AR-10	1000	Blando
AR-20	2000	Medio
AR-160	16000	Duro

Donde se le ha asignado la nomenclatura “AR” que corresponde a “Residuo Envejecido”.

Tabla A.1.3 Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo a su penetración.

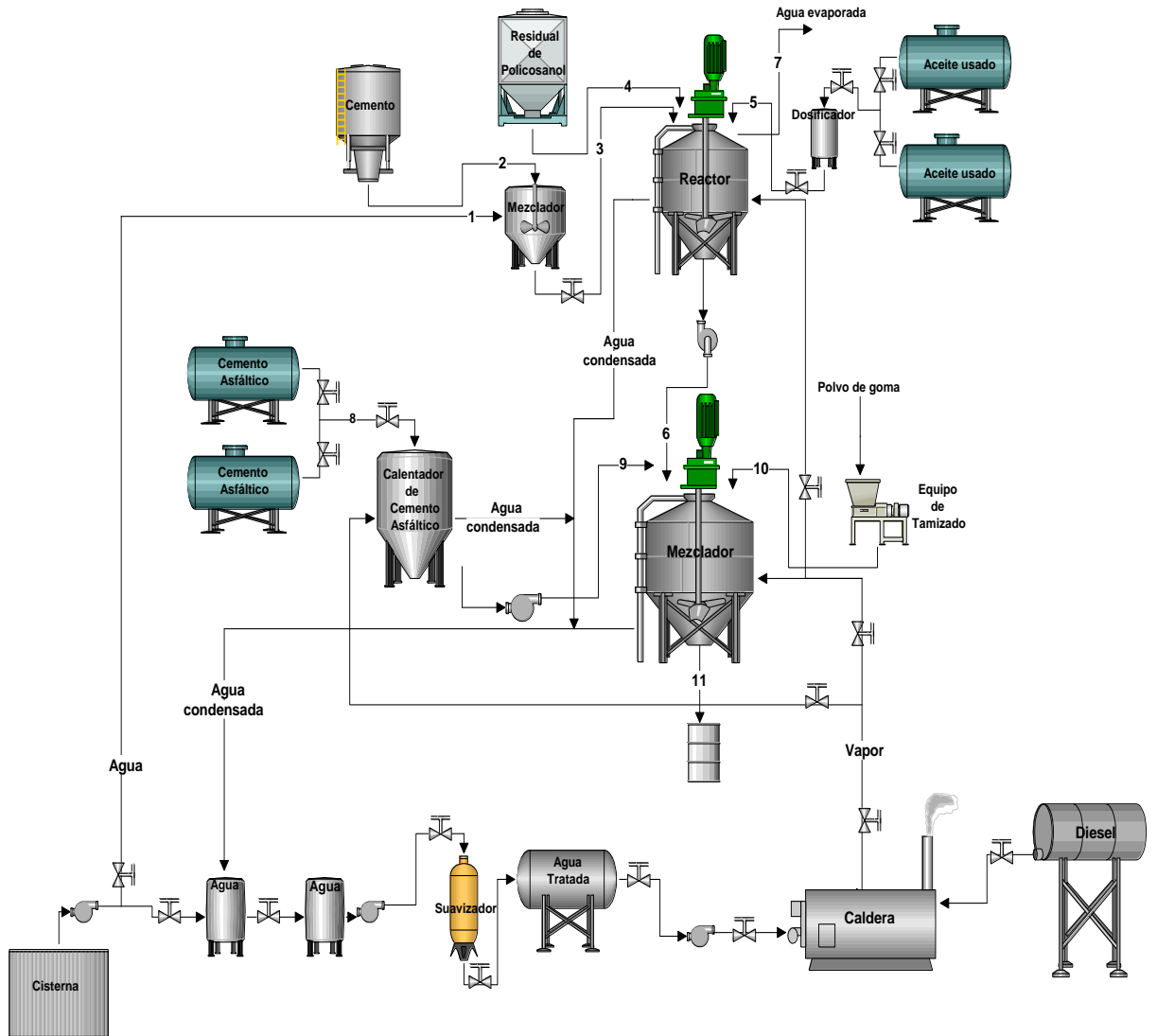
<i>Tipo</i>	<i>Penetración a 25°C (100g/5s)</i>	<i>Clasificación</i>
CA 200-300	200-300	Blando
CA 50-70	50-70	Medio
CA 40-50	40-50	Duro

*Tabla A.1.3 Aplicación del cemento asfáltico de acuerdo a su penetración.*

Tipos	Aplicación
CA 40- 50	para sellado de juntas de pavimento de hormigón
CA 50 - 70	En concreto asfáltico e impermeabilizantes
CA 85 - 100	En concreto asfáltico e impermeabilizantes
CA 120- 150	Tratamientos superficiales

Donde las dos cifras indican los límites máximos y mínimos de la penetración.

## Anexo 2: Diagrama de la propuesta del proceso de producción de impermeabilizante de cubierta.



### Anexo 3: Características físico-químicas presentes en el residual CNS.

Tabla A.3.1 Ácidos grasos más importantes presentes en el residual CNS.

<i>Ácidos Grasos</i>	<i>Contenido (%)</i>	<i>Rango de variación</i>	<i>Cadenas carbonadas</i>
Ácido Palmítico	8,97	5-15	C16
Ácido Esteárico	1,77	1-3	C18
Ácido Oléico	2,75	1-5	C18 insaturado
Ácido Octacosanóico	5,46	2-8	C28
Ácido Tricontanóico	3,56	2-6	C30
Ácido Dotricontanóico	2,03	1-3	C32

Tabla A.3.2 Características físicas y químicas presentes en el residual CNS.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	935
Temperatura de goteo [°C]	92
Humedad y materia volátil [%]	16
Índice de saponificación [mg de KOH / g de grasa]	29,3
Capacidad calórica [kJ/kg·K]	0,89

#### Anexo 4: Características físico-químicas del cemento Portland P-350.

Tabla A.4.1 Características químicas del cemento Portland P-350.

<i>Componentes</i>	<i>Valor (%)</i>
Dióxido de Silicio [SiO <sub>2</sub> ]	20,91
Óxido Férrico [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	3,75
Óxido de Aluminio [Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	5,01
Óxido de Calcio [CaO]	59,9
Óxido de Magnesio [MgO]	2,07
Trióxido de azufre [SO <sub>3</sub> ]	2,20
Silicato tricálcico [C <sub>3</sub> S]	46,75
Silicato dicálcico [C <sub>2</sub> S]	23,80
Aluminato tricálcico [C <sub>3</sub> A]	5,91
Ferrito Aluminato tricálcico [C <sub>4</sub> AF]	11,44

Tabla A.4.2 Características físicas del cemento Portland P-350.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	3,15
Capacidad calórica [kJ/kg·K]	0,77
Superficie Específica [cm <sup>2</sup> /g]	3352,3



**Anexo 5: Características físicas del tipo de aceite usado SAE 15W40 y del cemento  
asfáltico.**

*Tabla A.5.1 Características físicas del aceite usado SAE 15W40.*

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1050
Viscosidad a [cPs]	6,49
Capacidad calorífica a 100 °C [kJ/kg·K]	2,17

*Tabla A.5.2 Características físicas del cemento asfáltico.*

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1050
Viscosidad [Pa·s]	892
Capacidad calorífica [kJ/kg·K]	1,92

## Anexo 6: Características físico-químicas del polvo o viruta de goma.

Tabla A.6.1 Composición de diferentes tipos de neumáticos.

<i>Componentes</i>	<i>Tipo de vehículo (% en peso)</i>	
	<i>Automóviles</i>	<i>Camiones</i>
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	
Acero	14-15	
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16-17	

Tabla A.6.2 Características físicas del polvo o viruta de goma.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	950
Capacidad calorífica [kJ/kg·K]	1,74

## Anexo 7: Dimensiones del Reactor a escala planta piloto.

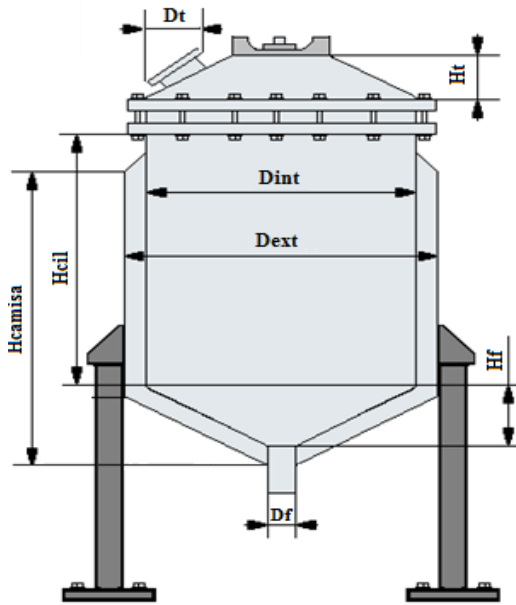


Figura A.7.1 Vista exterior del reactor a escala planta piloto.

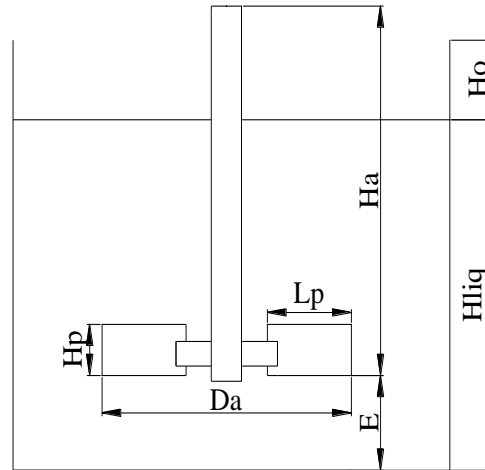


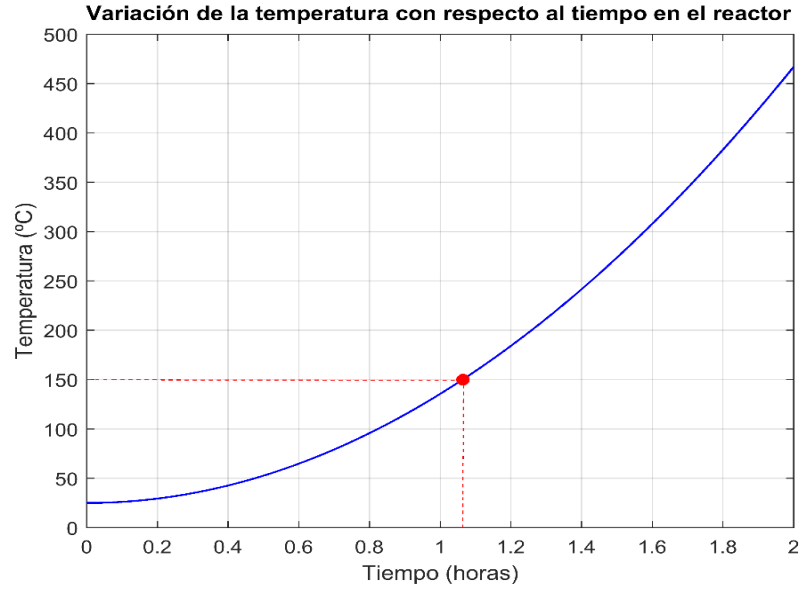
Figura A.7.2 Vista interior del reactor a escala planta piloto.

Tabla A.7.1 Dimensiones del reactor a escala planta piloto.

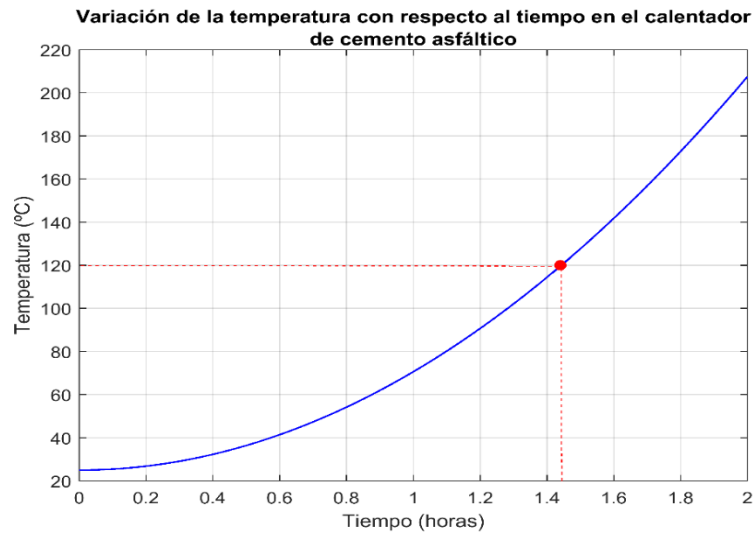
Parámetros	Valor
Volumen: $V$ [m <sup>3</sup> ]	0,88
Diámetro interior: $D_{int}$ [m]	1,05
Diámetro exterior: $D_{ext}$ [m]	1,25
Altura del cilindro: $H_{cil}$ [m]	1,045
Altura camisa: $H_{camisa}$ [m]	1,395
Altura del fondo: $H_f$ [m]	0,45
Diámetro fondo: $D_f$ [m]	0,13

Altura tapa: $H_t$ [m]	0,19
Diámetro base motorreductor: $Dbm$ [m]	0,26
Diámetro tapa: $D_t$ [m]	0,3
Espesor de la camisa: $E_{cam}$ [m]	0,1
Velocidad de agitación: $N$ [rpm]	78
Potencia agitador: $P$ [kW]	1,04
Diámetro horizontal del agitador: $Da$ [m]	0,33
Altura total del agitador: $Ha$ [m]	1,6
Altura liq: $H_{liq}$ [m]	1,3
Altura libre: $H_o$ [m]	0,2
Longitud de la paleta: $L_p$ [m]	0,16
Altura de la paleta: $H_p$ [m]	0,08
Espesor de la paleta: $E_p$ [m]	0,015
Altura del fondo tanque a la paleta: $E$ [m]	0,1
Separación entre paletas: $S_p$ [m]	0,5

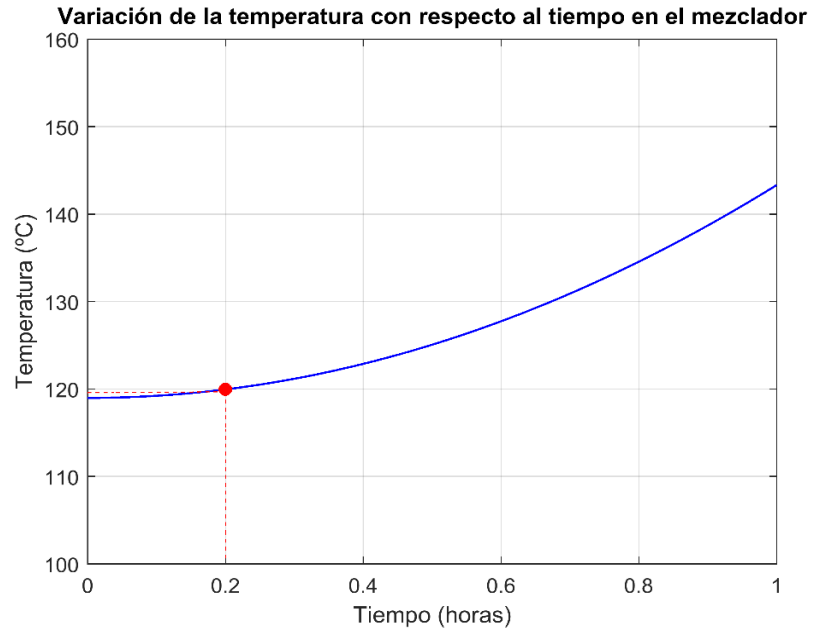
**Anexo 8: Gráficos obtenidos en Matlab para determinar el tiempo que demora alcanzar la temperatura requerida en los diferentes equipos.**



*Figura A.8.1 Gráfico de la variación de la temperatura con respecto al tiempo en el reactor.*



*Figura A.8.2 Gráfico de la variación de la temperatura con respecto al tiempo en el calentador de cemento asfáltico.*



*Figura A.8.3 Gráfico de la variación de la temperatura con respecto al tiempo en el mezclador.*

**Anexo 9: Flujo de caja.**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	3781442,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pagos totales	3781442,82	6853428,01	6853428,012	6853428,01	6853428,01	6853428,01	6853428,01	6853428,01	6853428,01	6853428,01	6853428,01
Cobros totales	0	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16	8178680,16
Mov. De fondos	-3781442,82	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15	1325252,15
Mov. De fondos acumulado	-3781442,82	-2456190,68	-1130938,53	194313,62	1519565,77	2844817,92	4170070,06	5495322,21	6820574,36	8145826,51	9471078,66
Mov de fondos actualizado	-3781442,82	1204774,68	1095249,709	995681,55	905165,05	822877,32	748070,29	680063,90	618239,91	562036,28	510942,07