

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO DE SECADO DE DETERGENTE EN
POLVO DE LA EMPRESA AZULK S.A**

**NICOLAS APONTE BARRETO
DIEGO ERNESTO CORTES SUAREZ**

Proyecto integral de grado para optar por el título de

Ingeniero Químico

**Orientador
EDGAR FERNANDO MORENO TORRES
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

Bogotá D.C. Febrero 2021

DIRECTIVOS DE LA UNVIERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico con todo mi amor a mis padres por su constante apoyo durante todo este largo proceso, por enseñarme y criarme con los valores que me formaron tanto profesional como personalmente, por brindarme su confianza y motivarme a seguir estudiando y nunca abandonar las metas que me propuse. A mi abuelita que ha estado a mi lado cuidándome y enseñándome desde pequeño y me ha visto crecer hasta el momento de mi grado apoyándome sin importar las circunstancias que se presentasen.

Todo este esfuerzo se lo dedico a ellos que serán los que me verán crecer como ingeniero químico y como persona.

Nicolás Aponte Barreto

A mi madre y a mi tía quienes han dado todo de si para que cumpliera este sueño y me brindaron toda su paciencia y apoyo, dedico este trabajo y todo lo que este conlleva, les agradezco por trazar el inicio de mi vida con amor y experiencia, y prometo continuar dando lo mejor de mi para alcanzar las metas que me he propuesto y superar las que me han permitido alcanzar.

Mi hermano quien ha sido mi guía y mi ejemplo con sabiduría y fortaleza, y me ha inspirado a seguir con la vida sin importar las circunstancias.

Finalmente, a mi padre quien me observa desde algún lugar y su recuerdo me ha dado fuerza y serenidad para pasar cada uno de los obstáculos que la vida me ha puesto, espero llenarlo de orgullo y cumplir todo lo que él deseaba para mí.

Diego Ernesto Cortés Suárez

AGRADECIMIENTOS

A la empresa AZULK S.A. por brindarnos la oportunidad de desarrollar este proyecto de grado.

Al ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres por su apoyo, orientación y colaboración en cada una de las etapas de este trabajo y por su asesoría profesional referentes a los temas propuestos en este trabajo.

Al ingeniero Ricardo Andrés Latino Ortiz, por su orientación, apoyo, paciencia y por depositar esa confianza en nosotros y en nuestro conocimiento desde el comienzo hasta el final.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el Cuerpo docente no son responsables por Los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	21
1 MARCO TEÓRICO	22
1.1 Secado de detergente	22
1.2 Torre de secado por atomización	23
1.3 Transferencia de masa	23
1.4 Transferencia de energía	24
1.5 Simulador ASPEN HYSYS	24
1.6 Simulador ASPEN PLUS	24
1.7 Componente hipotético	25
1.8 Calorimetría	26
1.9 Calorímetro	31
1.10 Norma técnica para la medición de humedad	32
1.11 Combustión	34
<i>1.11.1 Tipos de combustión.</i>	35
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	36

2.1	Determinación del calor específico del detergente base	36
2.1.1	<i>Determinación del calor específico del detergente puro</i>	46
2.2	Determinación de la densidad del detergente base	47
2.3	Determinación de la humedad del detergente base	52
3	CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE SECADO DE DETERGENTE EN POLVO	56
3.1	Balance de materia del sistema de secado	57
3.1.1	<i>Balance de materia del horno quemador.</i>	57
3.1.2	<i>Balance de materia de la torre de secado de detergente en polvo.</i>	68
3.2	Balance de energía del sistema de secado	72
3.2.1	<i>Balance de energía del horno quemador.</i>	72
3.2.2	<i>Balance de energía de la torre de secado de detergente en polvo.</i>	78
4	VALIDACIÓN DE DATOS MEDIANTE SIMULACIÓN	81
4.1	Simulación del horno quemador	81
4.1.1	<i>Propiedades del simulador.</i>	81
4.1.2	<i>Esquema y programación del simulador.</i>	82
4.1.3	<i>Resultados de la simulación.</i>	87
4.1.4	<i>Suposiciones de simulación.</i>	90
4.2	Simulación de la torre de secado	91
4.2.1	<i>Propiedades del simulador</i>	91
4.2.2	<i>Esquema y programación del simulador.</i>	94
	CONCLUSIONES	104

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datos obtenidos para la obtención del equivalente en agua del calorímetro.	39
Tabla 2. Datos obtenidos en la réplica realizada para obtener el equivalente en agua del calorímetro.	42
Tabla 3. Datos obtenidos para la calorimetría realizada a la mezcla detergente - agua	45
Tabla 4. Determinación de la densidad de la muestra del detergente base en el vaso de precipitado 1 a 22°C.	49
Tabla 5. Determinación de la densidad de la muestra del detergente base en el vaso de precipitado 2 a 22°C.	50
Tabla 6. Determinación de la densidad de la muestra del detergente base en la probeta a 22°C.	51
Tabla 7. Tabla comparativa de la densidad del detergente base.	52
Tabla 8. Datos tomados de la experimentación para hallar la humedad del detergente base.	54
Tabla 9. Resumen de los datos obtenidos para el detergente base.	55
Tabla 10. Propiedades relevantes de las corrientes M1, M2 y M3 mostradas en la Figura 10.	62
Tabla 11. Composición del gas natural con la base de cálculo.	63
Tabla 12. Estequiometría realizada al balance de masa con la base de cálculo.	65
Tabla 13. Propiedades relevantes de las corrientes A1, D1, A2 y D2 mostradas en la Figura 13.	70

Tabla 14. Entalpías estándares de formación.	72
Tabla 15. Calor de la reacción de combustión.	73
Tabla 16. Cálculo de las entalpías estándares para la combustión.	76
Tabla 17. Entalpia del sistema.	77
Tabla 18. Propiedades de las corrientes de entrada a la torre de secado.	79
Tabla 19. Propiedades de las corrientes de salida de la torre de secado.	80
Tabla 20. Tabla estequiométrica de las reacciones	85

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Calorímetro y sus partes.	32
Figura 2. Descripción de los elementos presentes en la combustión.	34
Figura 3. Calentamiento del agua en una plancha de calentamiento.	37
Figura 4. Calibración del calorímetro con mezcla de agua fría y agua caliente.	38
Figura 5. Calentamiento a 70 °C del detergente base utilizado como fluido caliente en la calorimetría.	43
Figura 6. Medición de la temperatura de equilibrio de la mezcla agua – detergente base.	44
Figura 7. Horno secador con los crisoles con muestra a secar.	53
Figura 8. Diagrama del proceso de fabricación de detergente en polvo.	56
Figura 9. Carta psicrométrica de Bogotá.	58
Figura 10. Diagrama del horno quemador.	61
Figura 11. Reacciones balanceadas para la combustión completa.	64
Figura 12. Balance de materia del horno quemador.	67
Figura 13. Diagrama base de la torre de secado de detergente en polvo.	69
Figura 14. Balance de materia de la torre de secado de detergente en polvo.	71
Figura 15. Lista de componentes.	82

Figura 16. Especificaciones GASN.	83
Figura 17. Especificaciones AIRH.	84
Figura 18. Programación estequiométrica del simulador.	85
Figura 19. Esquema general de la simulación.	86
Figura 20. Flujos máxicos asociados a FURNACE.	87
Figura 21. Características de operación del FURNACE.	88
Figura 22. Características del FURNACE en el caso 1.	90
Figura 23. Características del FURNACE en el caso 2.	91
Figura 24. Lista de Componentes ingresados al simulador.	93
Figura 25. Diagrama básico del intercambiador de calor.	95
Figura 26. Propiedades de la corriente Hot Air.	96
Figura 27. Composición de la corriente Hot Air.	97
Figura 28. Propiedades de la corriente Cold Detergent.	98
Figura 29. Composición de la corriente Cold Detergent..	99
Figura 30. Esquema general del proceso de la torre de secado.	100
Figura 31. Propiedades y composición de la corriente de salida Air.	101
Figura 32. Propiedades y composición de la corriente de salida Detergent.	102

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Definición de la cantidad de calor transferida de un fluido caliente a uno frío.	27
Ecuación 2. Calor transferido de un fluido caliente a un fluido frío.	27
Ecuación 3. Balance energético para calibrar el calorímetro.	29
Ecuación 4. Determinación del equivalente en agua del calorímetro expresado como K.	30
Ecuación 5. Ecuación para la determinación del contenido total de humedad.	33
Ecuación 6. Determinación del calor del agua fría.	39
Ecuación 7. Determinación del calor del agua caliente.	40
Ecuación 8. Determinación del equivalente en agua del calorímetro dado por la constante K.	40
Ecuación 9. Determinación del calor específico del detergente base.	45
Ecuación 10. Ecuación para la determinación de la densidad.	48
Ecuación 11. Determinación de la humedad del detergente.	53
Ecuación 12. Cálculo del contenido de humedad en el aire.	59
Ecuación 13. Cálculo de la humedad total en el aire.	59
Ecuación 14. Determinación de la cantidad necesaria real de gas natural.	66
Ecuación 15. Cálculo de entalpía del sistema	74

Ecuación 16. Cálculo de las entalpías estándares a una temperatura deseada	75
Ecuación 17. Ecuación definida para el cálculo de las pérdidas de calor de la torre de secado.	78
Ecuación 18. Cálculo de entalpia del detergente base.	78

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad realizar una evaluación energética de la torre de secado de detergente en polvo de la empresa AZULK S.A.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó una caracterización de las propiedades físicas del lodo que entra a la torre de secado, estableciendo el calor específico del detergente base de manera experimental con un procedimiento de calorimetría al encontrar el valor del equivalente en agua del calorímetro con su respectiva replica. Posterior a esto, se realizó un experimento similar, pero utilizando el detergente base como segundo fluido y con las respectivas formulas se encontró el calor específico del detergente base.

La segunda propiedad para establecer fue la densidad del detergente base por medio de dos vasos de precipitado con 60 mililitros de muestra a 22 grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y una probeta graduada con 50 mililitros de muestra y se procedió a realizar el pesaje de cada muestra en su respectivo instrumento para determinar la masa correspondiente del instrumento con la muestra. Se desarrollaron 4 ensayos por cada instrumento obteniendo sus respectivas medidas teniendo en cuenta la incertidumbre de cada uno. Al tener estas medidas se realizó el cálculo respectivo para encontrar la densidad a utilizar en cálculos posteriores.

La última propiedad a establecer fue la humedad contenida en el detergente base, para esto se utilizó en el laboratorio un horno de secado a 96 grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) para evaporar el agua contenida en el detergente base. Para esto se tomaron cuatro crisoles con una masa de detergente base y se introdujeron en el horno durante 4 horas aproximadamente obteniendo la masa seca para su respectiva medición. Al tener estas mediciones fue posible calcular el contenido de humedad del detergente base basándose en la norma técnica colombiana 1776.

Continuando con los objetivos del proyecto se desarrolló un balance de materia y balance energético tanto de la torre de secado de detergente en polvo como del horno quemador encontrando un balance de materia con resultados similares a los datos suministrados por la

empresa y un balance energético que reporta requerimientos de energía en el quemador y pérdidas energéticas en la torre de secado.

Para corroborar los datos arrojados por el anterior punto se buscó desarrollar simulaciones computarizadas de ambos procesos, tanto del horno como la torre de secado. En el primer caso la simulación del horno fue exitosa arrojando resultados cercanos a los balances del punto anterior.

Con estos datos se desarrollaron algunos casos de estudio flexibilizando los datos de flujo de aire de entrada y temperatura de salida confirmando la correcta operación del horno y revelando oportunidades de mejora desde dicho horno. En el segundo caso la simulación de la torre de secado fue infructuosa debido a la falta de datos estructurales y operacionales de la torre, y de valores de propiedades fisicoquímicas de algunos de los ingredientes del detergente mismo.

Para concluir, se encontró que las propiedades evaluadas de densidad y humedad corresponden a las esperadas, es decir un fluido más denso que el agua por su contenido de agua y un contenido de humedad cercano al reportado por la empresa. Igualmente, debido a la composición de sales del detergente la capacidad calorífica del detergente es mayor a la del agua.

En el proceso se usa una alta cantidad de aire evidenciando un alto consumo de gas natural, por esto, se utilizó un dato suministrado por la empresa como límite máximo de gas natural. Se encontró además que el horno requiere más energía para cumplir con las condiciones de salida del horno debido al exceso de aire entrante. Ahora para la torre de secado al ser un sistema abierto de flujo continuo se presentan altas pérdidas de energía ya que el aire de entrada posee una cantidad de energía superior a la necesaria para evaporar el agua contenida en el detergente base.

En los casos de estudio realizados, se encontraron condiciones favorables en las que el horno puede operar a condiciones en las que no se ven afectadas las propiedades del producto final, teniendo en cuenta la disminución de aire para el proceso y la disminución de la temperatura requerida en la corriente de entrada de gases de combustión para evaporar el agua del detergente

base. La simulación de la torre fue infructuosa debido a que es un sistema demasiado complejo y el simulador requiere datos más profundos del equipo que la empresa no posee, siendo difíciles de obtener empíricamente y al igual no sería adecuado suponerlos.

PALABRAS CLAVE: Secado. Atomizado. Simulación. Consumo. Gas natural. Detergente. Lodo.

INTRODUCCIÓN

AZUL K S.A.S. es una compañía 100% colombiana dedicada a la manufactura y comercialización de productos de aseo personal, de las prendas y del hogar, vigente en el mercado colombiano desde 1958. AZUL K S.A.S. es reconocida como una de las principales maquiladoras de jabón de tocador del país. Desarrollan sus productos basados en un sistema de gestión de calidad con certificación ISO 9001.

La planta tiene la capacidad para producir diferentes tipos de jabón y subproductos como la glicerina. Esta capacidad se vio reforzada al comenzar las operaciones de la planta de líquidos y de la planta para la producción de cremas lava loza, en septiembre de 2006 y julio de 2007 respectivamente.

La planta de producción de detergentes de AZULK S.A. actualmente posee una torre de secado para su línea de detergentes en polvo. Con la operación actual de esta torre y los demás procesos realizados en la planta el consumo del gas natural es excesivo, siendo la torre el mayor contribuyente de este gasto. Este consumo se refleja en la factura mensual de gas natural que alcanza un valor aproximado de 150.000.000 de pesos colombianos.

Dado este consumo la Empresa presenta inconformidades, pues considera que es significativamente alto. Aun así, el proceso es viable en todos sus aspectos por lo que la operación no ha sido interrumpida. Sin embargo, persiste el problema de consumo, que de ser solucionado podría radicar en la oportunidad de reducción de costos de servicio.

Por lo anterior, y a pesar del problema una alternativa que tiene la Empresa es ignorar el gasto de gas natural y continuar con el proceso. Otra de las opciones que tiene la Empresa es sugerir a sus operadores realizar un proceso iterativo de ensayo y error buscando mejorar el consumo sin afectar las otras condiciones de operación, por lo cual podrían incurrir en fallas o paradas del proceso, desembocando en pérdidas de materia prima y energía alterando las características del producto final.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrollará una evaluación energética a la torre de secado de detergente en polvo para establecer las condiciones del proceso y determinar si existe una posibilidad de mejora respecto al funcionamiento actual.

Los pasos que se siguieron para la evaluación energética de la torre de secado de detergente en polvo de la empresa AZULK S.A. serán abordados durante el desarrollo de este documento de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se describe el proceso de secado y el equipo utilizado para la producción de detergente en polvo, los fenómenos de transporte que se dan en el secador y se finaliza con la descripción del simulador utilizado para el desarrollo del trabajo.

En el capítulo 2, se describen las propiedades físicas del detergente base que entra a la torre de secado, siendo estas la determinación del calor específico, la determinación de la densidad y por último la determinación de la humedad.

En el capítulo 3, se describen los balances de masa y energía asociados al proceso de secado de detergente en polvo, es decir, el horno quemador de gas natural y la torre de secado de detergente en polvo. Se determinaron los flujos másicos del proceso y tanto los requerimientos energéticos como las pérdidas de energía del sistema.

En el capítulo 4, se desarrolló una simulación del horno quemador para comprobar los resultados obtenidos en el capítulo anterior y evaluar posibles casos favorables para el proceso de combustión. Igualmente, se desarrolló una simulación de la torre de secado la cual resultó fallida debido a la escasez de datos de ingredientes del detergente y de diseño de la torre.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una evaluación energética del proceso de secado de detergente en polvo de la empresa AZULK S.A.

Objetivos específicos

Establecer las características físicas del detergente que entra al proceso de secado por atomizado.
(Calor específico, densidad y humedad)

- Estimar las condiciones de operación del proceso de secado de detergente en polvo en relación con su consumo de gas.
- Validar las condiciones de operación del proceso de secado de detergente en polvo establecidas y sus rangos permitidos por medio de herramientas digitales de simulación.

1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos generales del proceso de secado de detergente en polvo describiendo el funcionamiento del equipo requerido además del proceso. Seguido de esto se definen los fenómenos de transferencia más importantes que ocurren durante el secado.

Además de esto, se describen los simuladores utilizados en el proyecto tanto Aspen Plus como Aspen Hysys y su respectiva utilidad para el cumplimiento del tercer objetivo, así como la justificación de la escogencia del método de propiedades para elaborar las simulaciones. Ya que en dichas simulaciones es necesario abordar componentes que no están contenidos en la base de datos del simulador, se desarrollaron componentes hipotéticos los cuales se definen y se muestran las propiedades necesarias para que el simulador realice cálculos aproximados de como interactuarían estos componentes con el simulador basándose en el método de propiedades escogido.

Se documenta el proceso respectivo para realizar tanto una calorimetría y la obtención de la constante K utilizada como equivalente en agua del calorímetro. Se trata el instrumento respectivo para realizar la calorimetría con sus respectivas partes y se aborda la norma técnica colombiana para la determinación de humedad utilizada en la elaboración de este proyecto.

1.1 Secado de detergente

El proceso de secado de detergente consiste principalmente en la entrada de un lodo por la parte superior de una torre de secado y una entrada de aire por la parte inferior de la misma, o en este caso gases de combustión a alta temperatura que por principios de transferencia de masa retira el agua contenida en el lodo, obteniendo como productos un gas con partículas de detergente, agua, gases de combustión, trazas de gas natural y los inertes que contiene el aire el cual debe ser conducido por un filtro de mangas para reducir el efecto ambiental. Por la parte inferior de la torre se pasa por inyectores de pulverización produciendo el detergente en polvo listo para empaquetar y distribuir.

1.2 Torre de secado por atomización

En un secador de pulverización o atomizado se dispersa una solución o suspensión en una corriente de gas caliente formando una niebla de gotas muy finas. La humedad se evapora muy rápido de las pequeñas gotas para formar partículas residuales de sólido seco, que después se separan de la corriente gaseosa. Los flujos de gas y líquido pueden ser en corrientes paralelas, en contracorriente o una combinación de ambos en una misma unidad.

“Las gotas se forman en una cámara cilíndrica de secado por la acción de boquillas de presión, boquillas de dos fluidos o en secadores de gran tamaño, por medio de discos de pulverización que giran a gran velocidad. En todos los casos es esencial evitar que las gotas o partículas húmedas de sólido choquen con superficies sólidas antes de que el secado tenga lugar, por lo cual la cámara de secado ha de ser necesariamente grande. Son frecuentes diámetros de 2.5 a 9 m.” [1].

Es una técnica rápida y, proporciona un producto más fácil de transportar debido a su tamaño, mayor homogeneidad en el producto es de fácil automatización y el agua evaporada ayuda en la refrigeración de la partícula, permitiendo usar altas temperaturas en el aire de secado.

1.3 Transferencia de masa

“La transferencia de masa es el movimiento neto de masa desde una ubicación, lo que generalmente significa flujo, fase, fracción o componente, a otra. La transferencia de masa ocurre en muchos procesos, como la absorción, evaporación, secado, precipitación, filtración por membrana y destilación.” [2]. El secado de un material se verifica por transferencia de masa del vapor de agua de la superficie saturada del material a través de una película de aire hasta la fase gaseosa general del ambiente circundante. La velocidad de desplazamiento de humedad dentro del sólido es suficiente para mantener la superficie saturada. “La velocidad de eliminación del vapor de agua (secado) está controlada por la velocidad de transferencia de calor hasta la superficie de evaporación, que suministra el calor latente de evaporación para el líquido.” [3].

1.4 Transferencia de energía

Es una disciplina de ingeniería térmica que se refiere a la generación, uso, conversión e intercambio de energía térmica entre sistemas físicos. La transferencia de calor se clasifica en varios mecanismos, como la conducción térmica, la convección térmica, la radiación térmica y la transferencia de energía por cambios de fase [2].

1.5 Simulador ASPEN HYSYS

“Es un simulador de procesos químicos utilizado para modelar matemáticamente procesos químicos, desde operaciones unitarias hasta plantas químicas completas y refinerías. HYSYS puede realizar muchos de los cálculos básicos de ingeniería química, incluidos los relacionados con el balance de masa, el balance de energía, el equilibrio de vapor-líquido, la transferencia de calor, la transferencia de masa, la cinética química, el fraccionamiento y la caída de presión.” [4]

Su beneficio dentro de este proyecto consta de su facilidad para construir o simular componentes no hallados dentro de su repositorio de sustancias, y generarlos como componentes hipotéticos basados en algunas características ingresadas dentro del programa. Estos componentes no hallados en repositorio son componentes básicos del detergente en su constitución por lo cual son necesarios para la simulación del tercer objetivo. La selección de métodos que se ajusten a la operación con sustancias electrolíticas como las que posee un detergente también es uno de sus fuertes, en este caso un método NRTL modificado es el ideal y el recomendado por el software para su utilización.

1.6 Simulador ASPEN PLUS

“Es un simulador de procesos con herramientas de modelado de proceso de diseño conceptual, optimización y monitoreo de desempeño para la industria química, polímeros, minerales y metales. Tiene la base de datos más amplia entre los simuladores de procesos comerciales, e incluye comportamiento de iones y de electrolitos. Además, modela y simula cualquier tipo de

proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra.” [5].

Su utilidad para el proyecto radica en el equipo llamado reactor estequiométrico o R. Stoic como aparece en el software el cual puede simular múltiples reacciones de conversión, ideal para identificar y ejecutar las reacciones de conversión halladas de la combustión del gas natural dentro del horno. Igualmente, la selección de métodos es similar a la de su compañero de paquete HYSYS y poseen prácticamente los mismos métodos, para la simulación del horno se seleccionó Peng-Robinson para su utilidad en reacciones de conversión y gases.

1.7 Componente hipotético

Dentro de la naturaleza y dentro de las conversiones y operaciones realizadas por el hombre hay una gran cantidad de sustancias químicas descritas tanto como elementos y compuestos, el hombre a través de la historia ha logrado identificar un sinnúmero de estas sustancias, pero por diferentes motivos tales como su tiempo de vida, porque son sustancias de transición entre las reacciones o se encuentran en mezclas imposibles de separar es muy difícil identificar sus características fisicoquímicas y no son descritos de la manera necesaria para su utilización.

Para describir de manera cercana dichas características hay diferentes programas que, con un par de propiedades, su estructura y su familia correspondiente, lo logra de manera sencilla, pero se ven condicionados por cálculos que pueden no ser los correctos ya que se basan en los datos ingresados por el usuario.

El paquete Aspen One V9® posee algunos programas tales como Aspen HYSYS en donde se pueden llevar a cabo tal generación de componentes que se nombrarán como hipotéticos, y su nombre se debe al supuesto que se hace para simular las verdaderas propiedades desconocidas de los componentes o sustancias.

Para la creación de componentes hipotéticos en este paquete es necesario tener al menos 3 de las siguientes características de la sustancia a simular:

- Punto Normal de Ebullición
- Peso Molecular
- Densidad Liquida
- Temperatura Critica
- Presión Critica
- Volumen Critico
- Acentricidad

Y finalmente se generan y se adicionan a la lista de componentes que se usaran dentro del simulador.

1.8 Calorimetría

En el desarrollo del primer objetivo se requirió determinar la capacidad calorífica del detergente necesaria para los objetivos posteriores, por este motivo, fue necesario hacer uso de una calorimetría.

Este proceso tiene como fin mezclar dos fluidos a diferentes temperaturas en los que se genera una transferencia de energía en forma de calor, desde el más caliente al más frío. Este tránsito de energía se mantiene hasta que la mezcla alcanza el equilibrio térmico. [6]. La cantidad de calor que se transfiere del fluido caliente o, la que absorbe el fluido frío se define como:

Ecuación 1.

Definición de la cantidad de calor transferida de un fluido caliente a uno frío.

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Donde:

Q = Cantidad de calor transferida del caliente al frío

m = Masa del líquido

C_p = Capacidad calorífica del líquido

ΔT = Variación de temperatura que experimentan

“Para este proceso las transferencias de calor se miden en un calorímetro y como todo instrumento es necesario calibrarlo. Para esto se utilizan dos fluidos iniciales (agua fría y agua caliente), se mezclan y se mide su temperatura de equilibrio; parte de esa energía es absorbida por el vaso Dewar.” [6] En consecuencia, la variación del conjunto formado por la mezcla y el calorímetro se puede escribir como:

Ecuación 2.

Calor transferido de un fluido caliente a un fluido frío.

$$m_1(T_1 - T_e) + C_k(T_e - T_2) + m_2(T_e - T_2) = 0$$

Nota. Esta ecuación define que la cantidad de calor cedido por el fluido caliente es igual a la cantidad de calor absorbido tanto por el calorímetro como por el fluido frío. Tomado de: *Fundamentos de química-práctica 5. Calorimetría*, Upo.es. [En Línea]. Disponible en: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/quimbiotec/FQpractica5.pdf>

Donde:

m_1 = Masa del fluido frio

T_1 = Temperatura del fluido frio

T_e = Temperatura de equilibrio

C_k = Capacidad calorífica del calorímetro

m_2 = Masa del fluido caliente

T_2 = Temperatura del fluido caliente

En otros casos, la capacidad calorífica de un calorímetro se puede definir como el producto de la masa total del calorímetro por el calor específico promedio de los componentes del interior. Esto se denomina con la constante K .

“Ahora bien, para la calibración del calorímetro el fluido más utilizado es agua, se usa como calor específico promedio $1 \text{ cal/ } ^\circ\text{C g}$, esto equivale a considerar una masa de K gramos de agua, que absorbería (o cedería) la misma cantidad de calor que el calorímetro para la misma variación de temperatura. Este valor de K se le llama también el equivalente en agua del calorímetro y se referente tanto al recipiente como a sus accesorios.” [7]

Teniendo en cuenta la **Ecuación 2**, dentro del calorímetro se tiene una masa de agua m_1 a la temperatura T_1 que generalmente es el fluido frio, se mezcla con otra masa de agua m_2 a la T_2 y una vez alcanzada la temperatura de equilibrio T_e . Para definir el balance de energía en el calorímetro se tomó en cuenta que K es el equivalente en agua del calorímetro y $T_1 < T < T_2$, obteniendo la siguiente ecuación:

Ecuación 3.

Balance energético para calibrar el calorímetro.

$$(m_2 * c + k)(T_2 - T_e) = m_1 * c (T_e - T_1)$$

Nota. Esta ecuación define el balance energético para la calibración del calorímetro. Tomado de: *Capacidad calorífica de un calorímetro y calor específico de un sólido*, Física.ucn.cl, 2016. [En Línea]. Disponible en: <http://www.fisica.ucn.cl/wp-content/uploads/2018/03/CAPACIDAD-CALORIFICA.pdf>

Donde:

m1 = Masa del fluido frío (agua)

T1 = Temperatura del fluido frío

Te = Temperatura de equilibrio

T2 = Temperatura del fluido caliente (agua)

m2 = Masa del fluido caliente (agua)

c = Calor específico del agua (1 cal/ °C gr)

k = Equivalente en agua del calorímetro

De esta fórmula se despeja el valor de K y se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 4.

Determinación del equivalente en agua del calorímetro expresado como K.

$$K = m_1 * c \frac{(T_e - T_1)}{(T_2 - T_e)} - m_2 * c$$

Nota. Esta ecuación determina el equivalente en agua del calorímetro que se expresa como K.

Tomado de: *Capacidad calorífica de un calorímetro y calor específico de un sólido,*

Física.ucn.cl, 2016. [En Línea]. Disponible en: <http://www.fisica.ucn.cl/wp-content/uploads/2018/03/CAPACIDAD-CALORIFICA.pdf>

Donde:

m1 = Masa del fluido frío (agua)

T1 = Temperatura del fluido frío

Te = Temperatura de equilibrio

T2 = Temperatura del fluido caliente (agua)

m2 = Masa del fluido caliente (agua)

c = Calor específico del agua (1 cal/ °C gr)

k = Equivalente en agua del calorímetro

1.9 Calorímetro

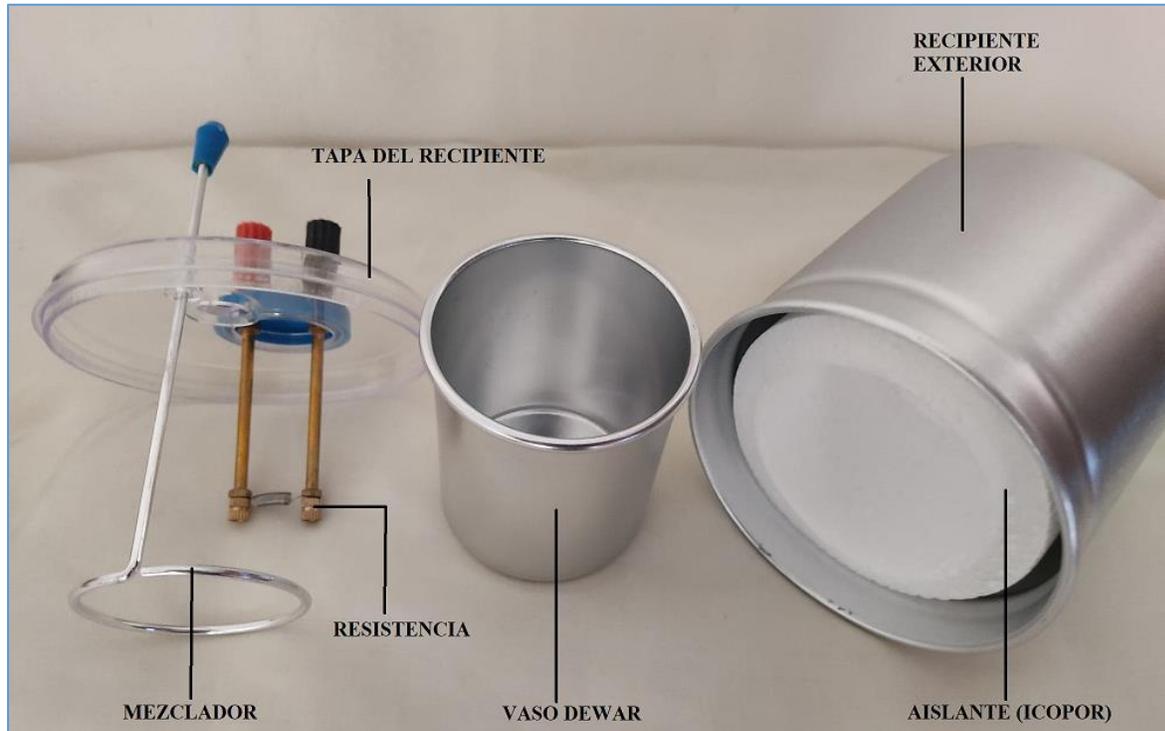
Es un instrumento utilizado para medir las cantidades de calor cedidas o absorbidas por un cuerpo. Está construido de tal forma que impide la conducción de calor a través de él, es decir, posee un aislamiento para evitar pérdidas de calor al ambiente.

El calorímetro está compuesto de un recipiente exterior, un aislante (en este caso se utiliza icopor), un vaso Dewar que es un recipiente diseñado para proporcionar aislamiento térmico y disminuir las pérdidas de calor por conducción, convección o radiación.

En la siguiente figura se muestran sus partes:

Figura 1.

Calorímetro y sus partes.



Nota. En esta figura se muestran las partes del calorímetro siendo el recipiente exterior para contener a las demás piezas, el aislante que en este caso es icopor para evitar transferencias de energía hacia el ambiente, el vaso Dewar donde se mezclan los fluidos a utilizar y además echo de materiales que disminuyen la conducción de calor tanto por radiación, por convección y por conducción y finalizando con la tapa del recipiente que contiene la resistencia para calentar los fluidos en el vaso Dewar y el mezclador para mezclar ambos fluidos hasta lograr la temperatura de equilibrio.

1.10 Norma técnica para la medición de humedad

Para los temas experimentales a tratar en el capítulo 2, es necesario abordar la norma técnica colombiana del método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados.

«En este proceso se seca completamente la muestra en el recipiente que la contiene, por medio de la fuente de calor seleccionada, teniendo el cuidado de evitar pérdida de partículas ya que un calentamiento muy acelerado puede hacer estallar algunas partículas produciendo su pérdida. Se usa un horno de temperatura controlada, cuando el calor excesivo pueda alterar las características del agregado o cuando se requieran mediciones más precisas. Si se utilizan fuentes de calor diferentes a los hornos de temperaturas controlables, se agita la muestra durante el secado, para acelerar la operación y así evitar el sobrecalentamiento en un solo punto. La operación de agitado es opcional cuando se utiliza un horno microondas.» [8]

Teniendo en cuenta lo anterior, el contenido total de humedad se calcula a partir de la relación:

Ecuación 5.

Ecuación para la determinación del contenido total de humedad.

$$W = 100 * \frac{(H - S)}{S}$$

Nota. Esta ecuación muestra la determinación del contenido total de humedad según la norma técnica colombiana. Tomado de: NTC 1776 – *Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados*, ICONTEC, Bogotá, 2019.

Donde:

W = Contenido de humedad de la muestra, en porcentaje.

H = Masa inicial de la muestra, en gramos.

S = Masa de la muestra seca, en gramos.

1.11 Combustión

“La combustión es el conjunto de procesos fisicoquímicos en los que un combustible (CaHb) se oxida en presencia de un elemento comburente (generalmente O₂ atmosférico), desprendiendo luz y calor en forma de llama, junto a otros productos químicos resultantes de la reacción” [9] descrita en la **Figura 2**.

Figura 2.

Descripción de los elementos presentes en la combustión.



Nota. La figura muestra los elementos más comunes presentes en las reacciones de combustión. Tomado de: C. Barrera Puigdollers, N. Betoret Valls, M. Castelló Gómez and E. Pérez Esteve, *Principios Básicos de la Combustión*, 1st ed. Valencia: Universitat Politècnica de València

Como resultado de la oxidación del carbono en el hidrocarburo o combustible hay una formación de CO₂, este es un gas de efecto invernadero y conocido contaminante que posee un límite de emisión en la atmosfera. Para evitar una alta contaminación atmosférica siempre conviene usar hidrocarburos de bajo peso molecular, es decir, que el subíndice “a” de la **Figura 2** sea bajo o una mezcla de estos tales como metano, etano, propano, butano, comúnmente hallados en gas natural refinado que posee un alto contenido de metano.

Para producir una combustión se deben tener 3 utilidades o componentes básicos en un mismo lugar y tiempo, estos componentes son: Combustible, comburente (O₂ normalmente) y fuente de energía o ignición (una pequeña chispa). Estas 3 utilidades en conjunto son conocidas como

triángulo de combustión o triángulo de fuego y sin la presencia de uno de los tres no se dará la combustión.

Adicional para que la combustión se ejecute, se requiere que el combustible se encuentre en estado gaseoso, por esta razón los combustibles líquidos y sólidos requieren calentarse primero hasta una temperatura llamada temperatura de gasificación, en la cual desprenden vapores y continúan calentándose hasta la temperatura de ignición, a la cual se inflaman espontáneamente.

1.11.1 Tipos de combustión.

Dependiendo de la cantidad de comburente que se adiciona a la mezcla a reaccionar se pueden dar los siguientes tipos de combustión:

- “Combustión completa, si se oxida todo el combustible y en los gases de combustión sólo aparece N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 . Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire igual o superior a la estrictamente necesaria según la estequiometría de la reacción.” [9]
- “Combustión incompleta, si no se oxida todo el combustible y aparecen inquemados en los gases de combustión (CO , H_2 , C , H_2S y C_nH_m), sustancias contaminantes que pueden seguir oxidándose. Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire inferior a la necesaria según la estequiometría de la reacción.” [9]

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental para el detergente base o lodo que entra a la torre de secado de AZULK S.A. con el propósito de hallar sus parámetros fisicoquímicos. Se inicia con la obtención experimental del calor específico del detergente base realizando una calorimetría y calibrando el equipo con su respectiva replica. Posteriormente, se repite el procedimiento con agua y el detergente base como fluidos.

En segundo lugar, se muestra la obtención de la densidad en el laboratorio utilizando una probeta y vasos de precipitado, y finalizando se define la humedad total del lodo por medio del uso de un horno secador.

Los equipos usados para este desarrollo experimental se aportaron por parte de la universidad, lo cuales se encuentran en perfectas condiciones y calibrados, sus fichas técnicas no pudieron ser solicitadas ya que al momento de la publicación del proyecto las circunstancias no lo permitieron, la universidad asegura su calidad y operabilidad.

2.1 Determinación del calor específico del detergente base

La determinación del calor específico del detergente base se realizó mediante una calorimetría cuyo principio es el de que entre varios cuerpos exista un intercambio térmico, la cantidad de calor ganado por un cuerpo es igual a la cantidad de calor perdido por el otro.

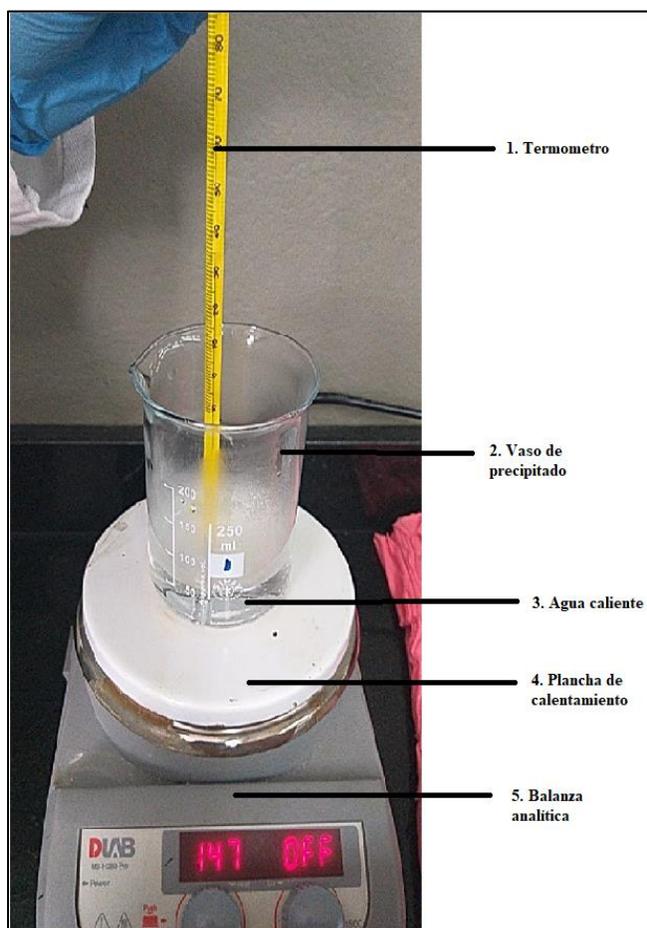
Inicialmente, es necesario calcular el equivalente en agua del calorímetro. Para esto se colocó en el calorímetro una masa **M1** de agua de 250 mililitros (ml) en un vaso de precipitado de masa de 111.8 gramos (g) estando vacío, para luego medir la temperatura **T1** y la masa del agua **M1** en el vaso de precipitado. Seguidamente se tomó el mismo volumen de agua y se llevó a una temperatura **T2** de 60 grados Celsius (°C) y se repitió la medición de masa **M2**.

Posteriormente se continuó con el proceso de calibración del calorímetro mezclando en el equipo mencionado la masa de agua **M1** con el agua **M2** hasta que se llegó a un equilibrio térmico del que se pudo obtener la temperatura de equilibrio **T3**.

En la **Figura 3** se muestra el procedimiento para llevar el agua a la temperatura deseada de 60 grados Celsius °C.

Figura 3.

Calentamiento del agua en una plancha de calentamiento.



Nota. Se muestra el aumento de temperatura del agua a 60 grados Celsius (°C) utilizando una plancha de calentamiento con sus respectivas partes.

En la **Figura 4** se muestra el equipo utilizado para la calorimetría al momento de hacer la mezcla entre la masa de agua **M1** y la masa de agua **M2**.

Figura 4.

Calibración del calorímetro con mezcla de agua fría y agua caliente.



Nota. Calorímetro utilizado para realizar la determinación de la capacidad calorífica del detergente que entra a la torre de secado. La función del calorímetro, su utilidad y sus partes se muestran en la sección **1.9 Calorímetro** del documento y en la **Figura 1** respectivamente.

A continuación, se presentan en la **Tabla 1** los datos obtenidos en la calibración del calorímetro antes de hacer la respectiva medición del detergente en polvo.

Tabla 1.

Datos obtenidos para la obtención del equivalente en agua del calorímetro.

Calibración					
Agua sin calentar		Agua Calentada		Mezcla	
Masa del vaso vacío (g)	111,8	Masa del vaso vacío (g)	111,8	T3 (°C)	39
Masa del vaso con agua (g)	171,4	Masa del vaso con detergente base (g)	170,7	Incertidumbre (°C)	±0,05
Incertidumbre (g)	±0,005	Incertidumbre (g)	±0,005		
M1 (g)	59,6	M2 (g)	58,9		
Incertidumbre (g)	±0,01	Incertidumbre (g)	±0,01		
T1 (°C)	19,5	T2 (°C)	60		
Incertidumbre (°C)	±0,05	Incertidumbre (°C)	±0,05		

Nota. Esta tabla muestra los datos obtenidos para la calibración del calorímetro.

Con estos datos se puede calcular el valor del equivalente en agua del calorímetro **K** basándose en que el **Q_A** es igual al **Q_C** cuando se utiliza el mismo fluido. Este desarrollo se muestra en la **Ecuación 6** y la **Ecuación 7**,

Ecuación 6.

Determinación del calor del agua fría.

$$Q_A = (M1 + K) * Ce * (T3 - T1)$$

Donde:

M1 = Masa del agua fría en gramos

K = Equivalente en agua del Calorímetro en gramos

Ce = Calor específico del agua (1 cal/g °C)

T3 = Temperatura de equilibrio de la mezcla en grados Celsius

T1 = Temperatura del agua fría en grados Celsius

Ecuación 7.

Determinación del calor del agua caliente.

$$Q_c = M2 * Ce * (T2 - T3)$$

Donde:

M2 = Masa del agua caliente en masa

Ce = Calor específico del agua (1 cal/g °C)

T3 = Temperatura de equilibrio de la mezcla en grados Celsius

T2 = Temperatura del agua caliente en grados Celsius

Siendo Q_A igual a Q_C se puede obtener una ecuación para determinar el valor del equivalente en agua del calorímetro **K** mostrado en la **Ecuación 8**.

Ecuación 8.

Determinación del equivalente en agua del calorímetro dado por la constante K.

$$K = M2 * \frac{T2 - T3}{T3 - T1} - M1$$

Donde:

M_1 = Masa del agua fría en gramos

M_2 = Masa del agua caliente en gramos

K = Equivalente en agua del Calorímetro en gramos

T_3 = Temperatura de equilibrio de la mezcla en grados Celsius

T_1 = Temperatura del agua fría en grados Celsius

T_2 = Temperatura del agua caliente en grados Celsius

Luego de aplicar estas ecuaciones se obtiene un **K** de 3.8308 gramos (g) necesario para calcular experimentalmente el calor específico del detergente base. Adicionalmente, para corroborar el dato obtenido para **K** se realizó una réplica del experimento con parámetros similares al ejercicio anterior, obteniendo los datos mostrados en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Datos obtenidos en la réplica realizada para obtener el equivalente en agua del calorímetro.

Replica					
Agua sin calentar		Agua Calentada		Mezcla	
Masa del vaso vacío (g)	111,8	Masa del vaso vacío (g)	111,8	T3 (°C)	39
Masa del vaso con agua (g)	171,4	Masa del vaso con detergente base (g)	170,7	Incertidumbre (°C)	±0,05
Incertidumbre (g)	±0,005	Incertidumbre (g)	±0,005		
M1 (g)	59,6	M2 (g)	58,9		
Incertidumbre (g)	±0,01	Incertidumbre (g)	±0,01		
T1 (°C)	19,5	T2 (°C)	60		
Incertidumbre (°C)	±0,05	Incertidumbre (°C)	±0,05		

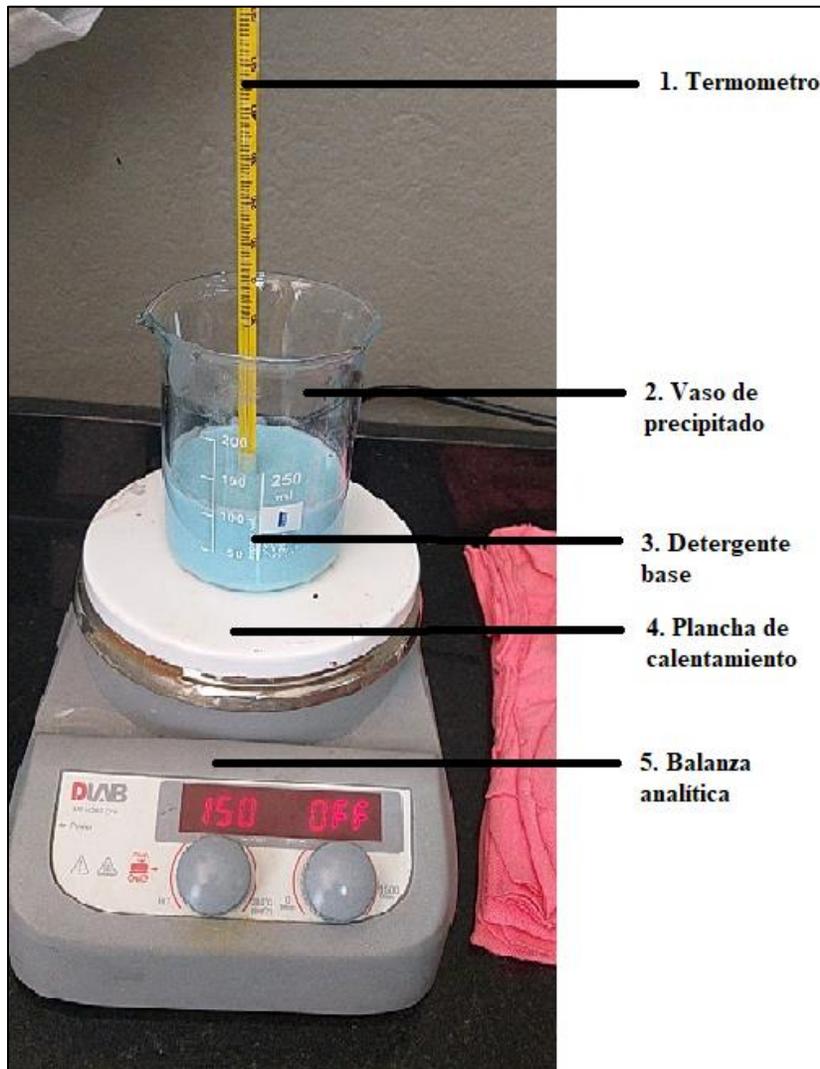
Nota. Esta tabla muestra una réplica del experimento sintetizado en la tabla 1 para corroborar el resultado del coeficiente **K** del calorímetro.

Con los datos obtenidos de la réplica se llegó a un valor de **K** de $3.6154 \pm 0,0207$ gramos (g), que fue utilizado para el cálculo del calor específico del detergente base al promediarse con el valor de **K** obtenido en el experimento desarrollado al inicio del capítulo. De este cálculo se obtuvo un valor final de **K** de $3.8308 \pm 0,0207$ gramos (g).

Luego de la obtención de este resultado se debe desarrollar un experimento similar utilizando como fluido 1 agua a temperatura ambiente y como fluido 2 el detergente base (que de ahora en adelante serán llamados **M1** y **M2** respectivamente) a una temperatura establecida de 70 grados Celsius (°C). En la **Figura 5** se muestra el aumento de temperatura del detergente base con una plancha de calentamiento a 150 grados Celsius (°C), y en la **Figura 6** se puede apreciar la medición de la temperatura en equilibrio de la mezcla del agua fría con el detergente base caliente.

Figura 5.

Calentamiento a 70 °C del detergente base utilizado como fluido caliente en la calorimetría.



Nota. Se muestra el calentamiento del detergente base a 70 grados Celsius (°C) para iniciar el experimento con este material.

Figura 6.

Medición de la temperatura de equilibrio de la mezcla agua – detergente base.



Nota. En la figura se muestra el momento en el que la temperatura de la mezcla (agua-detergente) llega al equilibrio. La función del calorímetro, su utilidad y sus partes se muestran en la sección **1.9 Calorímetro** del documento y en la **Figura 1** respectivamente.

En la **Tabla 3** se muestran los datos obtenidos del experimento en cuestión tomando **M1** como el agua fría y **M2** como el detergente base.

Tabla 3.*Datos obtenidos para la calorimetría realizada a la mezcla detergente - agua*

Calorimetría para el detergente base					
Agua sin calentar		Detergente base		Mezcla	
Masa del vaso vacío (g)	116,2	Masa del vaso vacío (g)	111,8	T3 (°C)	37
Masa del vaso con agua (g)	176,4	Masa del vaso con detergente base (g)	142,5	Incertidumbre (°C)	±0,05
Incertidumbre (g)	±0,005	Incertidumbre (g)	±0,005		
M1 (g)	60,2	M2 (g)	30,7		
Incertidumbre (g)	±0,01	Incertidumbre (g)	±0,01		
T1 (°C)	19,5	T2 (°C)	70		
Incertidumbre (°C)	±0,05	Incertidumbre (°C)	±0,05		

Nota. En esta tabla se muestran los datos obtenidos del agua sin calentar y la del detergente base para posteriormente mezclarlas y medir su temperatura en equilibrio.

Con estos datos obtenidos y tomando como base que el calor transferido del fluido 1 es igual al calor transferido del fluido 2 se desarrolla la **Ecuación 9**, con la que se puede encontrar el calor específico del detergente base.

Ecuación 9.*Determinación del calor específico del detergente base.*

$$C_{e2} = \frac{(M1 + K) * C_{e1} * (T3 - T1)}{M2 * (T2 - T3)}$$

Donde:

M1 = Masa del fluido frio (agua) en gramos

M2= Masa del fluido caliente (detergente base) en gramos

K = Equivalente en agua del Calorímetro en gramos

T3 = Temperatura de equilibrio de la mezcla (agua-detergente base) en grados Celsius

T1 = Temperatura del fluido frio (agua) en grados Celsius

T2 = Temperatura del fluido caliente (detergente base) en grados Celsius

Ce1 = Calor especifico del agua en cal/g °C

Ce2 = Calor especifico del detergente base en cal/g °C

Con la aplicación de esta ecuación se encontró de manera experimental el dato del calor específico del detergente base, siendo este de **1.106 ± 0,0245 cal/g°C**.

2.1.1 Determinación del calor específico del detergente puro

Con fines netamente académicos el proyecto indaga sobre cuál sería la capacidad calorífica del detergente puro, si la contribución del agua a la mezcla, que se determinó como detergente base, no estuviese y no fuera una mezcla detergente-agua. Para ello se asumió que la en la mezcla las características electrolíticas del detergente no afectan las propiedades en una mezcla con cualquier otra sustancia, en este caso el agua, que el calor específico de una mezcla simplemente es la suma de sus calores específicos multiplicado por el coeficiente de participación en la mezcla misma, es decir su porcentaje, que el calor específico del agua a temperatura ambiente (entre 18°C y 25°C) es de 1 cal/g°C y finalmente que el calor específico de la mezcla detergente-agua es el hallado en el anterior ítem (1.106 cal/g°C).

Teniendo en cuenta que la empresa le reporto al proyecto que los porcentajes de la mezcla son 25.8% agua y 74.2% detergente puro se procedió a realizar el cálculo siguiendo las suposiciones

descritas anteriormente, dando como resultado que el detergente puro tiene un calor específico de **1.143 cal/g°C**.

Este resultado no difiere en gran medida del resultado de la mezcla descrito en el anterior ítem e igualmente es un dato cercano al dato del agua, empíricamente se puede asumir que el detergente puro que fabrica la empresa posee ese calor específico pero no hay forma de compararlo con un dato teórico puesto que el proyecto no encontró datos de calores específicos de otros detergentes en polvo y los datos de detergentes líquidos no serían válidos teniendo en cuenta que ni siquiera se encuentra en el mismo estado.

2.2 Determinación de la densidad del detergente base

Inicialmente para determinar la densidad del detergente base por medio de la experimentación se buscaba emplear el método del picnómetro, pero la alta viscosidad del detergente no permitió el uso de este elemento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se optó por determinar la densidad del detergente base por medio de la experimentación utilizando métodos que siguieran el mismo principio, siendo esto a través de dos vasos de precipitado y una probeta con el fin de medir el volumen a una respectiva masa y obtener el dato de la densidad a través del cálculo matemático.

Para lo anterior se tomaron dos vasos de precipitado con volumen máximo de 200 mililitros (ml) en los cuales se definió un volumen constante de 60 mililitros de detergente base. Posterior a esto se pesaron los vasos sin muestra y se pesaron luego de adicionar el detergente realizando cuatro repeticiones por cada vaso a 22 grados Celsius (°C). Cabe resaltar que las mediciones tomadas fueron realizadas a muestras de detergente base del lote número 90315203.

Para comprobar este resultado experimentalmente se realizó la toma de medidas con la utilización de una probeta, en la que se pesó sin la muestra y se midió con 50 mililitros (ml) de detergente base.

Siguiendo con lo anterior, para calcular la densidad se hace uso de la **Ecuación 10**, que se describe a continuación.

Ecuación 10.

Ecuación para la determinación de la densidad.

$$\rho \left[\frac{g}{ml} \right] = \frac{\text{masa de la muestra}}{\text{volumen medido}} = \frac{m [g]}{V [ml]}$$

Donde:

m = Masa en gramos

V = Volumen en mililitros

ρ = Densidad en gramos/mililitros

Teniendo en cuenta la ecuación, se realiza el cálculo de la densidad teniendo ya los valores medidos para cada ensayo. A continuación, se muestra en la **Tabla 4** los resultados de los cuatro ensayos para el vaso de precipitado 1 y en la **Tabla 5** se muestran los resultados obtenidos para el vaso de precipitado 2.

Tabla 4.

Determinación de la densidad de la muestra del detergente base en el vaso de precipitado 1 a 22°C.

Vaso 1 a 22 °C									
Ensayo	Volume n (ml)	Incertidumbre e (mL)	Masa vacía (g)	Masa con muestra (g)	Incertidumbre e (g)	Masa muestra (g)	Incertidumbre e (g)	Densidad (g/ml)	Incertidumbre e (g/ml)
1	60	±0,5	45,89	141,57	±0,005	95,68	± 0,51	1,5947	±0,0218
2	65	±0,5	45,89	149,19	±0,005	103,3	± 0,51	1,5892	±0,0201
3	60	±0,5	45,89	143,43	±0,005	97,54	± 0,51	1,6257	±0,0220
4	60	±0,5	45,89	144,36	±0,005	98,47	± 0,51	1,6412	±0,0222

Nota. En esta tabla se muestran los resultados obtenidos de densidad para cuatro ensayos con el vaso de precipitado 1.

Tabla 5.

Determinación de la densidad de la muestra del detergente base en el vaso de precipitado 2 a 22°C.

Vaso 2 a 22 °C									
Ensayo	Volume n (ml)	Incertidumbre e (mL)	Masa vacía (g)	Masa con muestra (g)	Incertidumbre e (g)	Masa muestra (g)	Incertidumbre e (g)	Densidad (g/ml)	Incertidumbre (g/ml)
1	60	±0,5	50,95	144,52	±0,005	93,57	± 0,51	1,5595	±0,0215
2	60	±0,5	50,95	142,26	±0,005	91,31	± 0,51	1,5218333 3	±0,0212
3	60	±0,5	50,95	143,62	±0,005	92,67	± 0,51	1,5445	±0,0214
4	60	±0,5	50,95	142,22	±0,005	91,27	± 0,51	1,5211666 7	±0,0212

Nota. En esta tabla se muestran los resultados obtenidos de densidad para cuatro ensayos con el vaso de precipitado 2.

Para la realización de la prueba con la probeta se desarrollaron 4 ensayos de manera similar a los hechos con los vasos de precipitado, estas mediciones se registraron en la **Tabla 6.** Que se muestra a continuación.

Tabla 6.

Determinación de la densidad de la muestra del detergente base en la probeta a 22°C.

Probeta a 22 °C									
Ensayo	Volume n (ml)	Incertidumb re (mL)	Masa vacía (g)	Masa con muestr a (g)	Incertidumb re (g)	Masa muestr a (g)	Incertidumb re (g)	Densida d (g/ml)	Incertidum bre (g/ml)
1	50	±0,5	70,3	147,3	±0,005	77	± 0,51	1,54	±0,0256
2	50	±0,5	70,3	149,58	±0,005	79,28	± 0,51	1,5856	±0,0261
3	50	±0,5	70,3	147,97	±0,005	77,67	± 0,51	1,5534	±0,0257
4	50	±0,5	70,3	148,32	±0,005	78,02	± 0,51	1,5604	±0,0258

Nota. En esta tabla se muestran los resultados obtenidos de densidad para cuatro ensayos realizados en la probeta.

Al obtener estos datos de la densidad, se logró encontrar una aproximación a la densidad real de detergente base utilizando como promedio de los cuatro ensayos de cada experimento. Luego de esto, se realizó una comparativa en la **Tabla 7** de los datos obtenidos con el valor de la densidad para el detergente base encontrado en la bibliografía, siendo este el criterio principal para la elección del dato a usar en los procedimientos siguientes.

Tabla 7.

Tabla comparativa de la densidad del detergente base.

Prueba	Densidad [g/cm³]
Vaso de precipitado1	1,6127 ±0,0431
Vaso de precipitado 2	1,5368 ±0,0426
Probeta	1,5599 ±0,0516

Nota. En esta tabla se muestran los datos promedio obtenidos de la densidad del detergente base de los experimentos realizados anteriormente.

Tomando en cuenta los datos obtenidos en la **Tabla 7** se promediaron los datos de densidad de detergente base de los experimentos realizados para obtener el valor a utilizar en los cálculos requeridos más adelante, este dato es de **1,5697 g/cm³**.

2.3 Determinación de la humedad del detergente base

Para la determinación de la humedad del detergente base se realizó mediante experimentación a través del calentamiento de la muestra buscando la evaporación del contenido de agua. Esto se realizó tomando cuatro muestras de detergente en contenedores de porcelana y midiendo su respectivo peso sin la muestra y con ella, a continuación, se introducen los contenedores con muestra en un horno secador a una temperatura de 96 grados Celsius (°C) y con un tiempo de 4 horas aproximadamente para evaporar el agua contenida en el detergente base.

En la **Figura 7** se puede observar el equipo utilizado y los cuatro contenedores de la muestra a los cuales se les realizaron el calentamiento para la evaporación del agua contenida.

Figura 7.

Horno secador con los crisoles con muestra a secar.



Nota. Esta figura muestra el horno de secado con cuatro crisoles con detergente en polvo para realizarle el calentamiento y determinar la cantidad de agua contenida.

Luego de realizar este proceso se pesan los contenedores con la muestra seca obteniendo el último dato requerido para poder calcular el porcentaje de humedad del detergente base que entra a la torre de secado. Este cálculo se realiza mediante la **Ecuación 11** para determinar el porcentaje de humedad de una muestra. Que se describe a continuación.

Ecuación 11.

Determinación de la humedad del detergente.

$$W = 100 * \frac{(H - S)}{S}$$

Donde:

W = Contenido de humedad de la muestra, en porcentaje.

H = Masa inicial de la muestra, en gramos.

S = Masa seca de la muestra, en gramos.

Desarrollando esta ecuación con los datos obtenidos en el laboratorio se obtuvo el porcentaje de humedad contenido en cada muestra. Estos datos y su respectivo cálculo se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8.

Datos tomados de la experimentación para hallar la humedad del detergente base.

Ensayo	M0(g)	M1(g)	M2(g)	Incertidumbre (g)	% de Humedad	Incertidumbre
1	18,08	31,96	28,65	±0,005	23,8473	±0,0892
2	17,99	28,62	26,19	±0,005	22,8598	±0,1156
3	17,83	30,72	27,58	±0,005	24,3600	±0,0965
4	15,54	26,85	24,2	±0,005	23,4306	±0,1091

Nota. En esta tabla se muestran los datos obtenidos de 4 ensayos para la determinación de la humedad del detergente base. Donde M0 es la masa del crisol vacío en gramos, M1 la masa del crisol con la muestra húmeda en gramos y M2 es la masa del crisol con la muestra seca en gramos.

Con el fin de utilizar un valor fijo en el desarrollo de los próximos objetivos se realizó un promedio de los datos obtenidos para el porcentaje de humedad, siendo para el detergente base un contenido de humedad del **23,6244% ±0,2062%**.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los datos experimentales hallados.

Tabla 9.

Resumen de los datos obtenidos para el detergente base.

Propiedad	Valor	Unidades
Capacidad calorífica	1,1060	cal/g °C
Densidad	1,5697	g/cm ³
Humedad	23,6244%	

Nota. En esta tabla se presentan los datos experimentales hallados para capacidad calorífica, densidad y humedad, los cuales serán utilizados para el desarrollo de los siguientes objetivos.

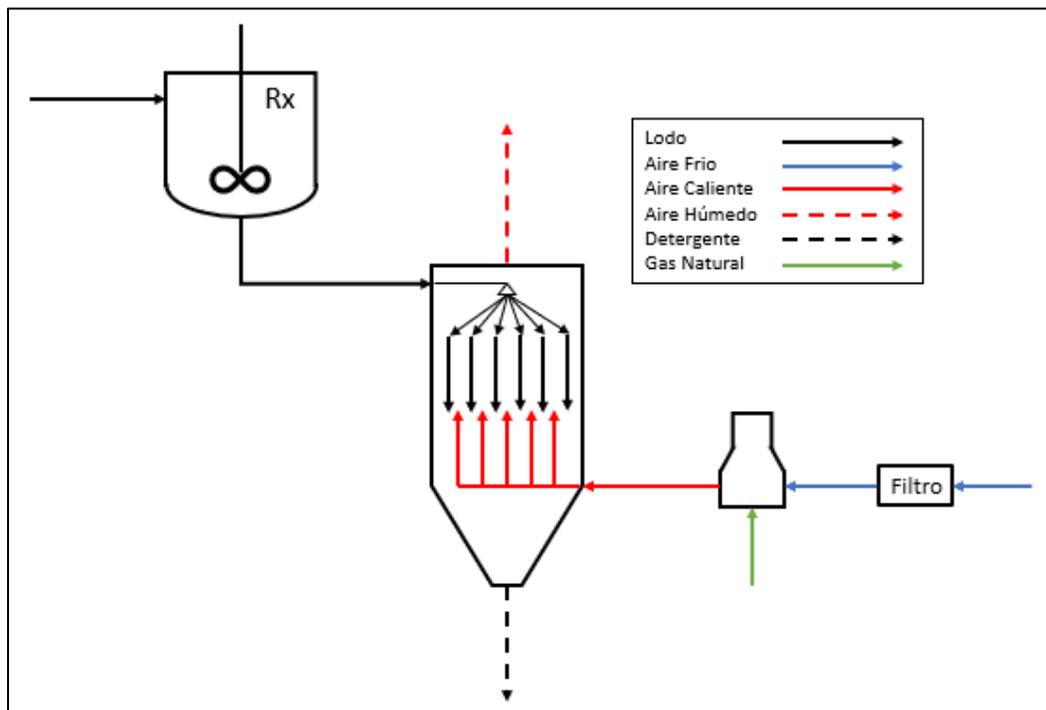
3 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE SECADO DE DETERGENTE EN POLVO

En este capítulo se presenta el diagrama de proceso del desarrollo de los balances de masa y energía tanto de la torre de secado como el quemador de gas natural para definir matemáticamente las condiciones de operación de la torre de secado de detergente en polvo de AzulK S.A.

A continuación, se muestra un diagrama del proceso que ocurre para la fabricación del detergente en polvo.

Figura 8.

Diagrama del proceso de fabricación de detergente en polvo.



Nota. La figura describe el proceso de elaboración de detergente en polvo de la empresa AzulK S.A

Se describe el diagrama básico del proceso en la **Figura 8** en la que se aprecia un reactor que produce hasta cuatro batch de detergente base o también llamado lodo producto de la reacción de neutralización y una cantidad considerable de agua contenida. Esta corriente resultante ingresa a la torre de secado por la parte superior y mediante boquillas es atomizado. También se aprecia el horno quemador al cual le entra tanto gas natural proveniente de la compañía de gas que contrata AzulK S.A y aire atmosférico que se pasa por un filtro para retirar posibles contaminantes presentes. En este horno se presenta la combustión y se produce de esta reacción una salida de gases de combustión con trazas de aire y gas natural a 420 grados Celsius (°C) que ingresa por la parte inferior a la torre de secado que al tener contacto con las partículas de detergente base o lodo atomizado previamente se produce la transferencia de masa respectiva retirando cierta cantidad de agua del lodo. Este detergente seco sale por la parte inferior de la torre como polvo con una humedad del 1.5% y en la parte superior sale el gas que entro a la torre con un contenido de humedad superior hacia un filtro de mangas para retirar trazas de detergente contenidas en este gas, disminuyendo perdidas de detergente y posibles contaminantes emitidos a la atmosfera.

Para desarrollar este objetivo, se inicia con el balance de masa del quemador con el fin de encontrar la cantidad de gas utilizada para secar la cantidad de producto establecida y finalizando con el balance energía para comprobar los requerimientos energéticos de la torre y del quemador.

3.1 Balance de materia del sistema de secado

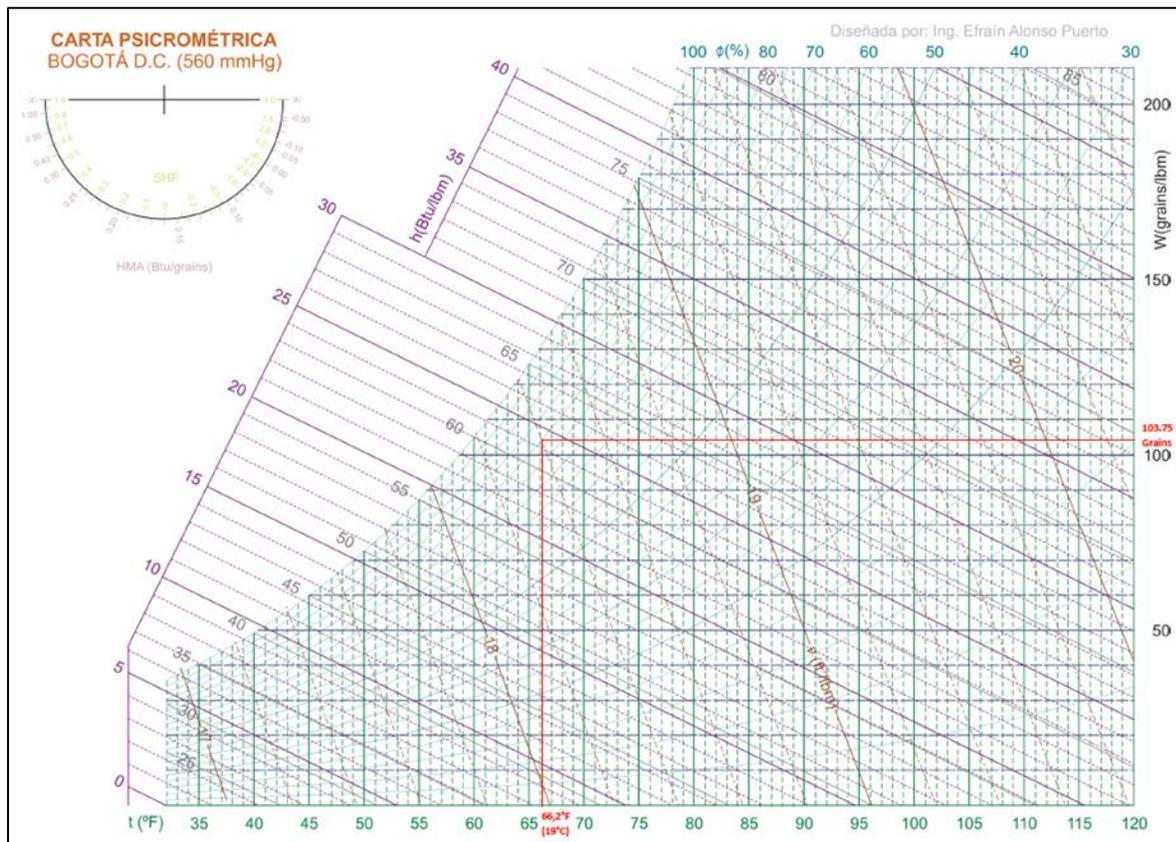
3.1.1 Balance de materia del horno quemador.

Se desarrolló inicialmente el balance de masa del quemador con una corriente de entrada M1 de aire atmosférico que con ayuda de una carta psicométrica de Bogotá Figura 6 se halló la humedad total del aire correspondiente al 1,460% del mismo referente a la zona de ubicación de la planta de producción la cual es 80% de humedad relativa [10] y una temperatura de 19 grados Celsius (°C) [10] basado en la Ecuación 12 y la Ecuación 13. Adicionalmente se produce la combustión del gas natural, la cual es otra corriente de entrada denominada M2 y una corriente

de salida M3 la cual contiene los compuestos inertes de ambas corrientes (N₂ y Ar), la cantidad de dióxido de carbono, la cantidad de monóxido de carbono y la cantidad de agua que se genera de la combustión con el oxígeno como reactivo en exceso.

Figura 9.

Carta psicrométrica de Bogotá.



Nota. Carta psicrométrica para Bogotá. Tomada de: Balance de masa y energía, “5.Humedad y Psicrometría” [En Línea] <http://energiaymasa.blogspot.com/2014/09/5-humedad-y-psicrometria.html>

Ecuación 12.

Cálculo del contenido de humedad en el aire.

$$130.75 \frac{\text{Grains } (H_2O)}{\text{lbm } (Dry Air)} * \frac{1\text{lbm}}{7000 \text{ grains}} \approx 0.01482 \frac{\text{lbm } (H_2O)}{\text{lbm } (Dry Air)} = 0.01482 \frac{\text{kg } (H_2O)}{\text{kg } (Dry Air)}$$

Ecuación 13.

Cálculo de la humedad total en el aire.

$$\frac{0.01482 \text{ kg}(H_2O) * 100\%}{1.01428 \text{ kg } (Total Air)} = 1.460\%$$

Tal como se describió al inicio de este ítem, se dio uso de la carta psicrométrica de Bogotá **Figura 9** para hallar el porcentaje de humedad en el aire. Se comenzó investigando las condiciones promedio de la zona industrial donde opera la torre de secado, según el IDEAM estas condiciones son 19 grados Celsius (°C) [10] y 80% de humedad relativa [10] con estos datos la carta psicrométrica nos permite hallar la humedad total del ambiente en granos de agua por libra masa de aire seco. Para dicha operación nos posicionamos en el eje inferior de la **Figura 9** la cual referencia la temperatura del ambiente en grados Fahrenheit (°F), así siendo los 19°C convertidos a 66.2°F para establecer el punto de partida de la línea roja de la figura, a continuación se trasladó en forma vertical hacia arriba hasta cruzarse con la curva correspondiente a 80% de humedad relativa generada desde el eje superior de la figura y con esta posición se trasladó horizontalmente hacia la derecha para hallar el reflejo del punto de cruce en el eje izquierdo de la figura que describiría la humedad total a las condiciones anteriormente mencionadas y dando como resultado 130.75 granos de agua por libra masa de aire seco.

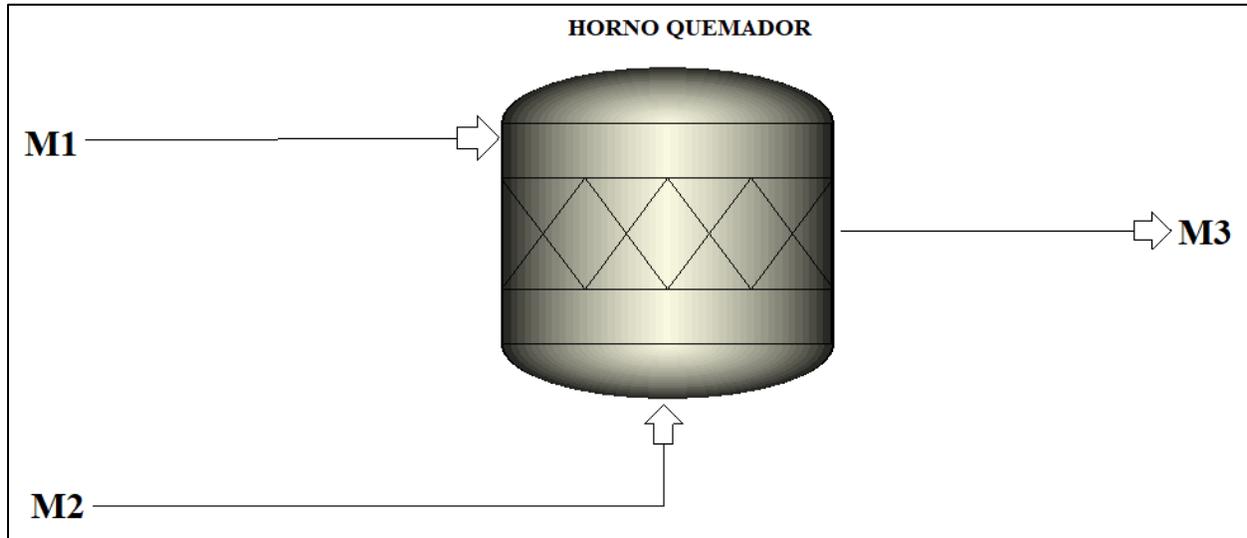
Con este dato se procedió a dar su conversión al sistema internacional tal como se muestra en la **Ecuación 12** y obtener el resultado de 0.01482 kg de agua por kg de aire seco.

Finalmente para hallar el porcentaje de humedad total en el aire del ambiente se ejecutó la **Ecuación 13** bajo el supuesto de que el denominador de dicha ecuación y la base de cálculo de la operación es la suma en masa del aire y el agua del ambiente siendo que por cada 1 kg de aire hay 0.01482 kg de agua y dando como resultado 1.01482 kg de aire húmedo o total, para luego asumir que esta masa es el cien por ciento (100%) de la masa de aire, y buscando calcular a cuanto equivale de este porcentaje la cantidad de los 0.01482 kg de agua que hay en ella, el resultado es descrito ultimadamente por la **Ecuación 13** como el 1.460% y entendiendo así que solo hay 1.46% de agua en el aire total del ambiente circundante a la torre de secado y la empresa.

En la **Figura 10** se muestra un diagrama del quemador con sus respectivas entradas y salidas.

Figura 10.

Diagrama del horno quemador.



Nota. Este diagrama muestra las corrientes de entrada y de salida del horno quemador, siendo **M1** la corriente de aire, **M2** la corriente de gas natural y **M3** la corriente de gases resultantes de la combustión.

En la **Tabla 10** se muestran algunas características de las corrientes mostradas en la **Figura 10**. Siendo la corriente M1 la corriente de aire atmosférico, M2 la corriente de gas natural y M3 la corriente de gases de combustión con trazas de aire y gas natural.

Tabla 10.

Propiedades relevantes de las corrientes M1, M2 y M3 mostradas en la Figura 10.

Propiedades	M1	M2	M3
Flujo masico (kg/h)	37000	314,3742	37315,274
Temperatura (°C)	25	25	450
Humedad (%)	1,46	0	3,194

Nota. Esta tabla muestra las propiedades relevantes de flujo masico, temperatura y humedad de las corrientes presentes en la Figura 10.

Ya que el objetivo del balance es encontrar la cantidad de gas natural requerido para secar una masa aproximada de 11988,44 kg/h de lodo (dato suministrado por AzulK S.A.) se tomó una base de cálculo de 1000 kg/h de gas natural y una suposición de la conversión del 100% para la combustión completa del mismo para hallar la cantidad de gas máximo requerido para el oxígeno presente en el aire entrante en la corriente **M1**.

En la **Tabla 11** mostrada a continuación se observa la composición del gas natural utiliza con sus respectivas masas acorde con la base de cálculo tomada.

Tabla 11.

Composición del gas natural con la base de cálculo.

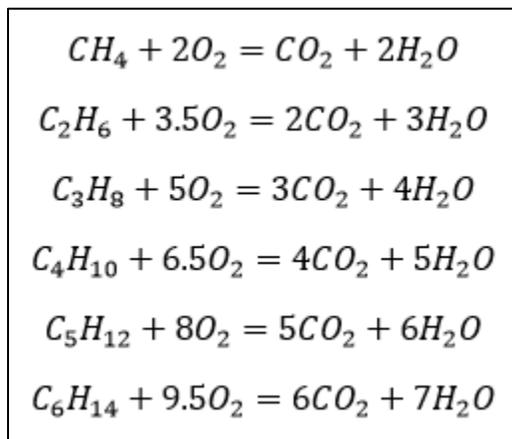
Compuesto	Porcentaje masico	Masa (kg/h)
CH ₄	91,0%	910
C ₂ H ₆	6,0%	60
C ₃ H ₈	1,0%	10
C ₄ H ₁₀	0,2%	2
C ₅ H ₁₂	0,2%	2
C ₆ H ₁₄	0,2%	2
N ₂	1,0%	10
CO ₂	0,4%	4
TOTAL	100,0%	1000

Nota. La tabla muestra el porcentaje masico del gas natural a trabajar y su respectivo flujo en el proceso.

Ahora para la realización de los balances se necesitaron las reacciones que ocurren en la combustión y balancearlas estequiométricamente, estas se muestran a continuación en la **Figura 11.**

Figura 11.

Reacciones balanceadas para la combustión completa.



Nota. Ecuaciones balanceadas de la combustión completa que ocurre en el horno secador.

Teniendo las reacciones de combustión y basándose en la estequiometría de la reacción se hizo un balance estequiométrico de las reacciones pasando las moles requeridas con la ayuda del peso molecular de cada una de las especies influyentes, tanto reactivos como productos obteniendo cuanto oxígeno se necesita para reaccionar con la base de cálculo tomada de gas natural. Estos resultados se muestran a continuación en la **Tabla 12**.

Tabla 12.

Estequiometría realizada al balance de masa con la base de cálculo.

Compuesto	Combustible (kg/h)	Oxígeno (kg/h)	CO2(kg/h)	Agua(kg/h)
Metano	910,000	3.629,788	2.496,827	2.044,096
Etano	60,000	223,409	175,630	107,838
Propano	10,000	36,270	29,939	16,340
Butano	2,000	7,155	6,058	3,100
Pentano	2,000	7,094	6,100	2,996
Hexano	2,000	7,053	6,128	2,927
Total	986,000	3.910,769	2.720,681	2.177,297

Nota. Esta tabla muestra la estequiometria realizada para la base de cálculo de la combustión tomada.

De esta tabla de resultados se obtiene la cantidad necesaria de oxígeno para la combustión completa de la base de cálculo y por consiguiente se puede conocer la cantidad de aire requerida para entrar al proceso utilizando la composición de aire de la siguiente manera: 20,95% Oxígeno, 78,09% Nitrógeno, 0,03% Dióxido de carbono y 0,93% Argón. Conociendo estos resultados y con un factor de conversión se obtuvo el aire requerido para el proceso con 1000 kg/h de gas natural y al tener este valor se obtuvo la cantidad de gas natural requerida para el proceso real, ya que se tiene el dato de la cantidad de aire entrante por hora al proceso.

En la **Ecuación 14** se muestran los resultados obtenidos mencionados anteriormente.

Ecuación 14.

Determinación de la cantidad necesaria real de gas natural.

$$7638,289636 \text{ kg } O_2 \text{ Real} * \frac{1000 \text{ kg gas}_{\text{base de calculo}}}{3910,769 \text{ kg } O_2 \text{ base de calculo}} = 1953,1427 \text{ kg}_{\text{gas real}}$$

Este valor obtenido es la cantidad necesaria por hora de gas natural para realizar una combustión completa y con 100% de conversión para el total de aire atmosférico que usa la empresa para dicha reacción, siendo este de 37000 kg/h.

Teniendo en cuenta que la finalidad del proyecto es realizar una evaluación energética lo más cercana posible al proceso real, se sacó un promedio de gas natural utilizado por AzulK S.A. La Empresa suministro un dato correspondiente de 0.0487651 m³/kg de detergente, es decir, que la empresa al producir aproximadamente 8895,4225 kg/h de detergente en polvo, el gasto de gas natural para producir esta cantidad es de 433,78585 m³. Ahora, para realizar el balance de masa se determinó la densidad del gas natural por contribución de componentes y con la ayuda de la ley de gases ideales, hallando la densidad promedio del gas la cual es de 0,7247221 m³/kg.

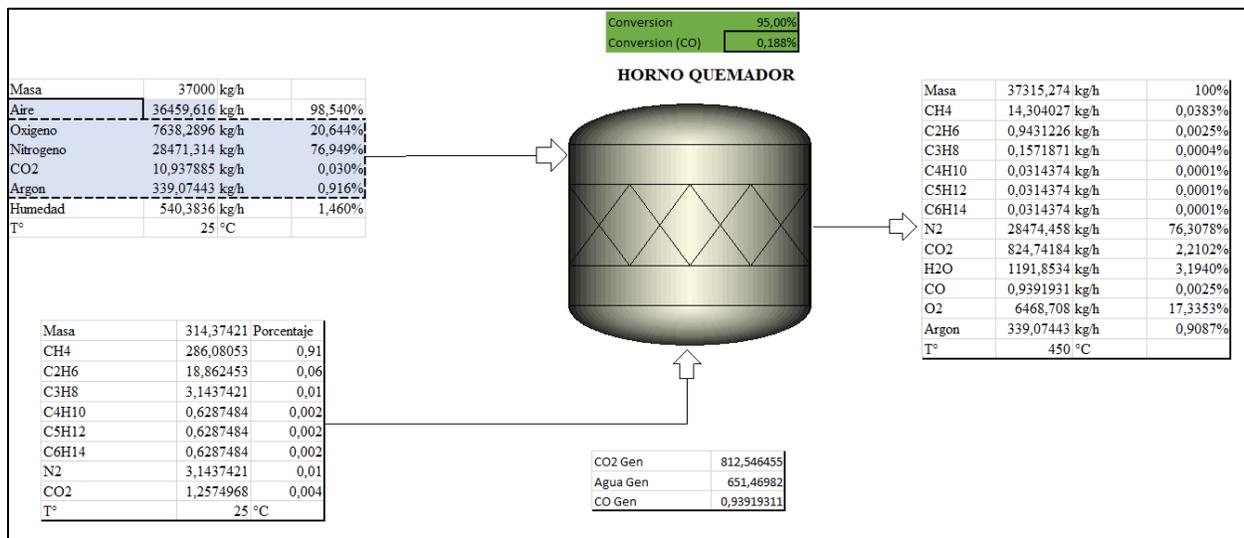
Con este valor calculado de la densidad y el volumen usado por la Empresa de gas natural se tiene una masa de gas natural de 314.37421 kg/h con la que se desarrollará el balance de masa tomando este valor como límite máximo de gas natural para el proceso.

Por lo anterior, se toma como suposición una conversión para la combustión completa del 95% dado que las combustiones completas se dan con un exceso de aire y como se demostró anteriormente el gas necesario para consumir todo el oxígeno del aire es mucho mayor al calculado, se toma un error de 5% de que se consuma totalmente este gas puesto que la operación del horno es de flujo continuo y aunque la reactividad del gas natural sea alta por su inflamabilidad, el tiempo de residencia dentro del horno es bajo y trazas del gas natural pueden salir dentro del gas de combustión. Para la combustión incompleta del metano se tomó una

conversión del 0,188% basándose en las mediciones de control de emisiones de la Empresa y solo se supuso conversión incompleta del metano puesto que es el que se encuentra en mayor proporción dentro del gas natural. En la **Figura 12** que se muestra a continuación se enseña el desarrollo del balance de materia del horno quemador con los datos iniciales descritos anteriormente.

Figura 12.

Balance de materia del horno quemador.



Nota. Se muestra en la figura el diagrama del horno secador con sus respectivas corrientes de entrada y salida.

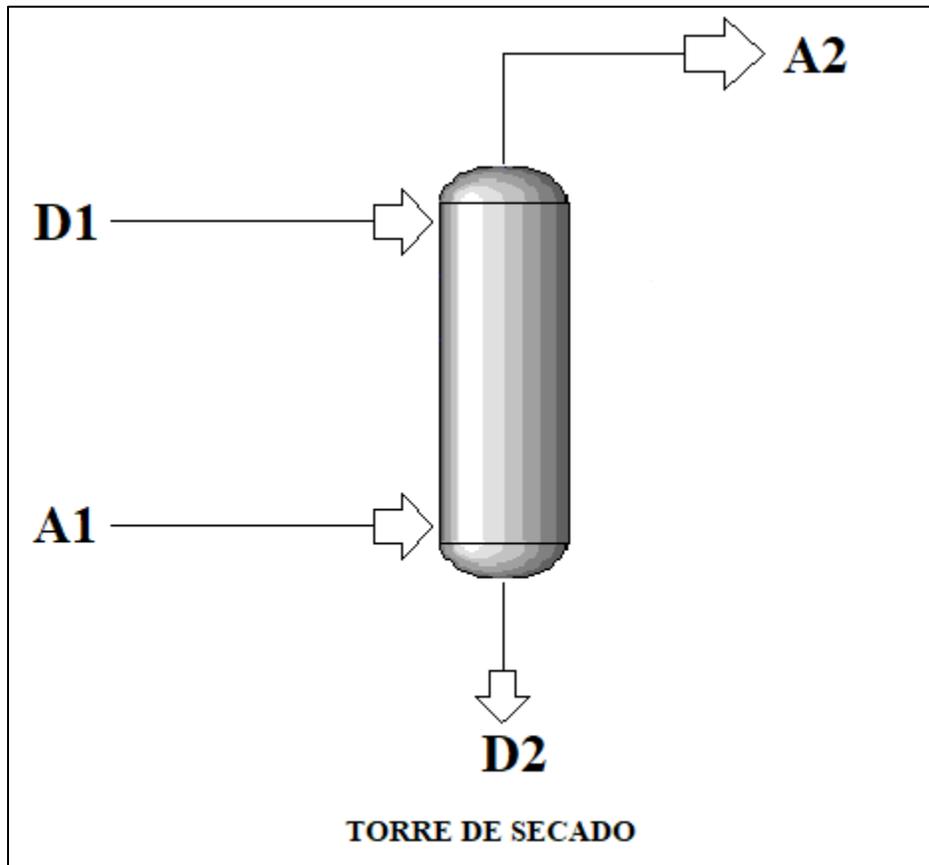
En la figura se muestran las corrientes de entrada cuya temperatura es de 25 grados Celsius (°C) y la corriente de salida resultante del proceso de combustión en el horno quemador con 95% de conversión para la combustión completa y 0,188% para la combustión incompleta dando las cantidades generadas de dióxido de carbono, agua y monóxido de carbono en la reacción. Esta corriente de salida resultante a 420 grados Celsius (°C) es la corriente que ingresará por la parte inferior de la torre de secado con un contenido de humedad del 3,194% para completar el proceso de secado de detergente.

3.1.2 Balance de materia de la torre de secado de detergente en polvo.

Continuando con el balance de materia del proceso de secado de detergente en polvo, se desarrolló el balance de materia de la torre de secado a la cual entra un flujo de detergente húmedo o lodo D1 por la parte superior de la torre a una temperatura de 76 grados Celsius (°C) proveniente de un madurador y con una humedad del 25,8%, y el flujo de salida del horno quemador A1 entra por la parte inferior de la torre de secado a 420 grados Celsius (°C) y dos corrientes de salida, la corriente D2 que es el detergente en polvo seco con una temperatura de 90 grados Celsius (°C) y con una humedad promedio suministrada por la Empresa del 1,546% sale por la parte inferior de la torre de secado y una corriente A2 de gas húmedo con un contenido de humedad relativa del 10,2939% a una temperatura de 120 grados Celsius (°C) por la parte superior de la torre hacia una chimenea. El diagrama del equipo se muestra a continuación en la **Figura 13.**

Figura 13.

Diagrama base de la torre de secado de detergente en polvo.



Nota. En esta figura se muestra el diagrama de la torre de secado con sus respectivas corrientes, siendo D1 el detergente base, A1 la mezcla de gases de combustión con trazas de aire y gas natural que sale del horno secador, D2 el detergente seco y A2 el gas húmedo resultante.

Tabla 13.

Propiedades relevantes de las corrientes A1, D1, A2 y D2 mostradas en la Figura 13.

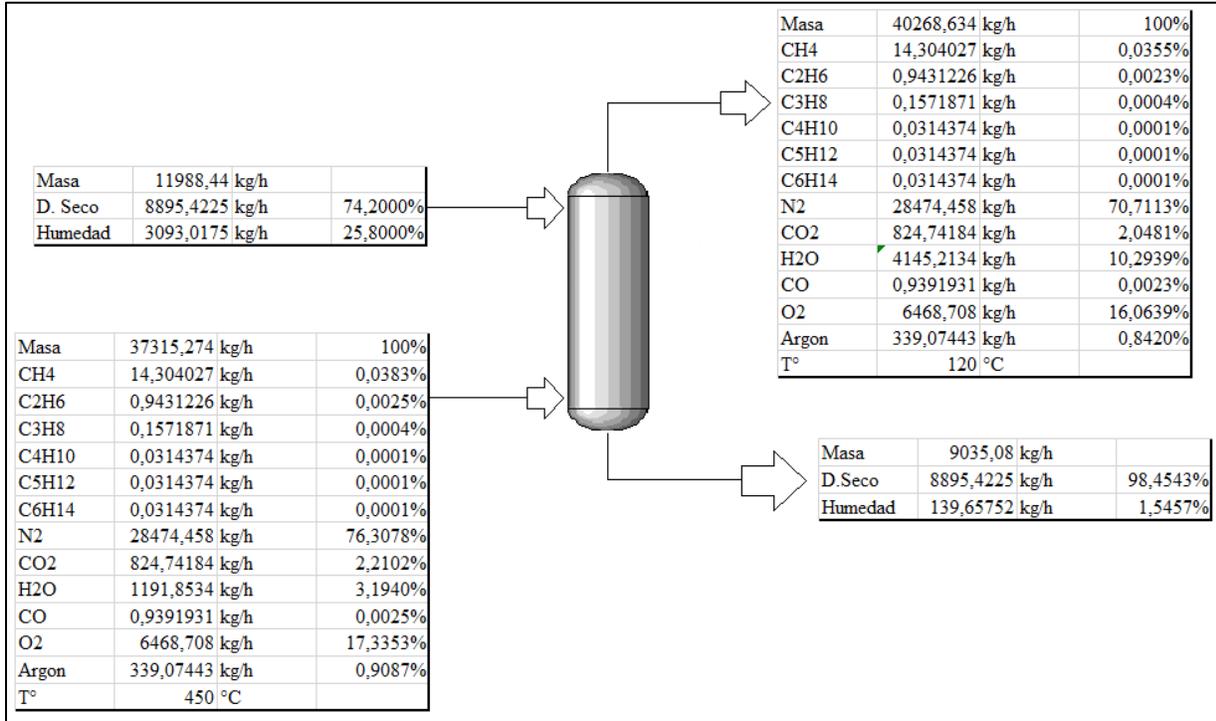
Propiedades	A1	D1	A2	D2
Flujo masico (kg/h)	37315,274	11988,44	40268,634	9035,08
Temperatura (°C)	420	76	120	90
Humedad (%)	3,194	25,8	10,293	1,5457

Nota. Se observan más propiedades de estas corrientes en la Tabla 18 y Tabla 19.

Para desarrollar el balance de materia se tomó el agua contenida en el lodo entrante **D1** y se hizo la diferencia con la cantidad de agua requerida en la corriente **D2** y que así cumpliera con el contenido de humedad establecido, esta cantidad de agua se le suma a la corriente de entrada de aire **A1** originando la corriente de salida **A2**. Esta corriente se dirige a un filtro de mangas ya que en el proceso la corriente de gases de combustión arrastra trazas de detergente, las cuales para el balance se desprecian ya que se recirculan al proceso por la cima de la torre de secado de detergente. Este cálculo se puede observar en la **Figura 14**, mostrada a continuación.

Figura 14.

Balace de materia de la torre de secado de detergente en polvo.



Nota. En la figura se muestran las corrientes de entrada y salida de la torre de secado tanto en fracción másica como en masa además de su respectiva temperatura.

Como se observa en la Figura el detergente seco cumple con el requerimiento final de humedad y la corriente de aire entrante a la torre de secado pasa de tener una humedad del 3,1940% a una humedad final de 10,2939% y una temperatura de 120 grados Celsius (°C).

3.2 Balance de energía del sistema de secado

3.2.1 Balance de energía del horno quemador.

Para desarrollar el balance de energía del horno primero se procedió a calcular la entalpia de formación de la combustión con el fin de obtener la energía que libera la reacción que se produce en el equipo. Para esto se utilizaron las entalpias estándares de formación en que se muestran en la **Tabla 14**

Tabla 14.

Entalpias estándares de formación.

Entalpias estándares de formación(kJ/mol)	
CH4	-74,8
C2H6	-84,4
C3H8	-103,8
C4H10	-124,7
C5H12	-173,1
C6H14	-198,7
CO	-110,4
CO2	-393,5
O2	0
H2O	-241,6

Nota. Esta tabla muestra las entalpias estándares de formación para la combustión. Tomada de: Y. Çengel and M. Boles, Termodinámica, 7th ed. México: McGraw-Hill, 1998, p. 912, 948.

Con las entalpias de formación se realizó el siguiente procedimiento, con las reacciones mostradas en la Figura 7 se hizo la sumatoria de la multiplicación del flujo molar de los productos con su respectiva entalpia estándar de formación menos la sumatoria de la

multiplicación del flujo molar de los reactivos con su respectiva entalpia estándar de formación. Con esto se obtiene los datos mostrados en la **Tabla 15**.

Tabla 15.

Calor de la reacción de combustión.

Calor de Reacción	
Metano	-13587130,9 kJ/h
Etano	-850616,951 kJ/h
Propano	-138363,504 kJ/h
Butano	-27309,6098 kJ/h
Pentano	-26856,2285 kJ/h
Hexano	-26708,4932 kJ/h
Metano (CO)	-17395,6939 kJ/h
Total	-1,47E+07 kJ/h

Nota. Se muestra en la tabla el calor de reacción para cada componente presente tanto para la combustión completa como para la combustión incompleta.

En esta tabla se muestra un valor negativo del calor de la reacción de combustión, esto concuerda con la realidad ya que las reacciones de combustión son exotérmicas lo cual siempre indicará un valor negativo para el calor de reacción.

Se continuó con el cálculo de la entalpia del sistema, ya que para el proceso los cambios en la energía potencial y la energía cinética son despreciables respecto a los cambios de entalpia y el proceso no tiene trabajo de eje la energía total del sistema se define como la energía del sistema con la adición de la energía producida por la reacción de combustión, este proceso se define con la **Ecuación 15**.

Ecuación 15.

Cálculo de entalpia del sistema

$$\Delta H = Q_{rxn} + \Sigma(n_{out} * \hat{H}_{out}) - \Sigma(n_{in} * \hat{H}_{in})$$

Nota. Ecuación que muestra el cálculo de la entalpia del sistema. Tomada de :C.J. Geankoplis, “*Procesos de transporte y operaciones unitarias*” 3era. Edición.

Siendo:

- Q_{rxn} : Calor de reacción en kJ/h
- n_{out} : Flujo molar de salida en kmol/h
- n_{in} : Flujo molar de entrada en kmol/h
- \hat{H}_{out} : entalpia estándar del componente de salida en kJ/kmol
- \hat{H}_{in} : entalpia estándar del componente de entrada en kJ/kmol

Para facilitar el cálculo de las entalpias estándares de entrada se tomó un estado de referencia correspondiente a 25 °C que es la temperatura de entrada de las 2 corrientes al horno, estado gaseoso ya que todas las corrientes se encuentran en ese estado y presión atmosférica siendo esta de 1 atm. Utilizando este estado de referencia las entalpias estándares de entrada equivalen a 0 para todos los componentes.

Ahora para el cálculo de las entalpias estándares de salida se utilizó la **Ecuación 16** la cual es una corrección para la temperatura de salida de 420 °C.

Ecuación 16.

Cálculo de las entalpías estándares a una temperatura deseada

$$\hat{H} = \hat{H}_{ref} + C_p \int_{T_{ref}}^T dT = C_p(T - T_{ref})$$

Nota. Esta ecuación define el cálculo de las entalpías estándares para una temperatura deseada.

Tomada de: "PRINCIPIOS DE TERMOQUÍMICA", Universidad de los Andes de Venezuela.

[En Línea].

<http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16744/termoquimica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Luego de utilizar esta ecuación se obtuvieron los datos necesarios para calcular la entalpia total del sistema mostrado en la **Tabla 16** que se enseña a continuación.

Tabla 16.*Cálculo de las entalpías estándares para la combustión.*

Componentes	Entrada			Salida		
	Flujo Molar (kmol/h)	T° (°C)	\hat{H} (kJ/kmol)	Flujo Molar (kmol/h)	T° (°C)	\hat{H} (kJ/kmol)
Metano	17,835	25	0	0,892	420	14103,491
Etano	0,627	25	0	0,031	420	20714,622
Propano	0,071	25	0	0,004	420	29073,146
Butano	0,011	25	0	0,001	420	38889,836
Pentano	0,009	25	0	0	420	47422,752
Hexano	0,007	25	0	0	420	56303,979
CO	0	25	0	0,034	420	11495,444
CO2	0,277	25	0	18,74	420	14670,315
Oxígeno	238,771	25	0	202,21	420	11599,894
Agua	29,996	25	0	66,159	420	13271,2
Nitrógeno	1016,582	25	0	1016,582	420	11506,508
Argón	8,487	25	0	8,487	420	8210,464

Nota. En la tabla se muestran los datos de las entalpías estándares para la combustión completa e incompleta, tomando 25 grados Celsius como temperatura de referencia y 420 grados Celsius como temperatura de salida.

Realizando la respectiva resta de productos menos reactivos de la multiplicación del flujo molar por su entalpía estándar se obtuvo el valor de la energía del sistema sin tomar en cuenta el calor de reacción obteniendo los datos mostrados en la **Tabla 17**.

Tabla 17.

Entalpia del sistema.

Energía del sistema (kJ/h)	
Metano	1,26E+04
Etano	6,50E+02
Propano	1,04E+02
Butano	2,10E+01
Pentano	2,07E+01
Hexano	2,05E+01
CO	3,85E+02
CO2	2,75E+05
Oxígeno	2,35E+06
Agua	8,78E+05
Nitrógeno	1,17E+07
Argón	6,97E+04
Total	1,53E+07

Nota. Entalpia total del sistema calculada para cada componente presente en la combustión cuyo valor es positivo debido al requerimiento energético del horno necesario para cumplir con las condiciones establecidas.

Con la utilización de la **Ecuación 15** se obtiene el valor de la entalpia total del sistema, obteniendo un valor de 604936,90 kJ/h. Teóricamente el valor positivo indicara que el sistema requiere de más energía para lograr las condiciones de la corriente de salida, esto es incongruente ya que el equipo real funciona correctamente y las teorías de esto es que puede existir discordia en la veracidad de los datos o que el equipo este teniendo perdidas de energía hacia el ambiente.

3.2.2 Balance de energía de la torre de secado de detergente en polvo.

Para el balance de energía de la torre de secado se describe que la energía de las corrientes de entrada es igual a la energía de las corrientes de salida más el calor requerido para el cambio de fase del agua contenida en el detergente más las pérdidas de calor del sistema. Lo anterior se muestra en la **Ecuación 17**.

Ecuación 17.

Ecuación definida para el cálculo de las pérdidas de calor de la torre de secado.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{aire\ in} * H_{aire\ in} + \dot{m}_{producto\ in} * H_{producto\ in} \\ = \dot{m}_{aire\ out} * H_{aire\ out} + \dot{m}_{producto\ out} * H_{producto\ out} + \dot{m}_{agua} \\ * \Delta H_v + q \end{aligned}$$

Para utilizar esta ecuación y hallar el valor de las pérdidas de calor de la torre de secado **q** es necesario aclarar los términos requeridos en la ecuación, como calor de vaporización del agua se utilizó el valor de 2257 kJ/kg [11] y se refiere a la cantidad de energía necesaria para transformar un gramo de agua en estado líquido a agua en estado gaseoso a una temperatura y presión constantes ya que el agua contenida en el detergente cambia de estado; y el flujo másico del agua que es la cantidad que se retira del detergente y entra a la corriente de aire siendo este un valor de 2953,36 kg/h. Ahora, para encontrar la entalpia del detergente se utilizó la **Ecuación 18** descrita a continuación.

Ecuación 18.

Cálculo de entalpia del detergente base.

$$H_{detergente} = C_{p\ detergente} * (T_p - T_{Ref}) + w * C_{p\ agua} * (T_p - T_{Ref})$$

Siendo w la humedad de la corriente de detergente, el calor específico del detergente hallado en el capítulo de experimentación y el calor específico del agua calculado a su respectiva temperatura siendo en estado líquido para la corriente de entrada y en estado gaseoso para la de salida, y los datos de entalpía del aire se obtuvieron de tablas termodinámicas. En las siguientes tablas se puede observar los datos obtenidos para cada corriente siendo la **Tabla 18** para las corrientes de entrada y la **Tabla 19** para las corrientes de salida.

Tabla 18.

Propiedades de las corrientes de entrada a la torre de secado.

Entrada		
Propiedad	<i>Aire</i>	<i>Detergente</i>
Flujo másico (kg/h)	37315,2738	11988,44
Temperatura (°C)	420	76
Entalpía (kJ/kg)	702,7029	290,9609
Humedad	3,1940%	25,80%
Cp (kJ/kg °C)		4,6231

Nota. Condiciones de las corrientes de entrada, tanto para la corriente de aire caliente como para la de detergente base.

Tabla 19.

Propiedades de las corrientes de salida de la torre de secado.

Propiedad	Salida	
	<i>Aire</i>	<i>Detergente</i>
Flujo másico (kg/h)	40268,6338	9035,08
Temperatura (°C)	120	90
Entalpia (kJ/kg)	394,0615	302,4042
Humedad	10,2939%	1,5457%
Cp (kJ/kg °C)		4,6231

Nota. La tabla presenta los datos de las corrientes de salida, es decir, la corriente de aire al finalizar el secado y el detergente en polvo que sale por la parte inferior de la torre de secado.

Ahora con los datos registrados anteriormente y el uso de la **Ecuación 17** se calculan las pérdidas de calor de la torre de secado de detergente en polvo, obteniendo un valor de 11109154,87 kJ/h.

4 VALIDACIÓN DE DATOS MEDIANTE SIMULACIÓN

En este capítulo se expone el desarrollo de la simulación computarizada de algunas partes del proceso en estudio, con el fin de asegurar que algunos de los resultados de cálculos manuales expuestos en el capítulo anterior son acertados o cercanos a la realidad.

Para dicha verificación se usó el software computacional Aspen Plus® del paquete AspenONE® V9 de la compañía Aspen Technology Inc., el cual posee múltiples características que aseguran que los cálculos realizados en él sean veraces.

4.1 Simulación del horno quemador

4.1.1 *Propiedades del simulador.*

Se inició la simulación, con una hoja en blanco en el simulador puesto que ninguna de las hojas preprogramadas o con formato se ajustaban al proceso a estudiar.

Posteriormente se seleccionó los componentes que se trabajaran en el equipo a simular. Puesto que es una combustión se inició con el combustible el cual está compuesto por los primeros 6 hidrocarburos alcanos, luego se seleccionó el comburente, cabe resaltar que el comburente común es el oxígeno y se obtiene directamente del aire atmosférico que se simula calentar, por lo que se tuvo que agregar junto con el resto de los componentes comunes del aire tales como el nitrógeno, el argón y el dióxido de carbono, y finalmente se agregaron los compuestos producidos en las reacciones de combustión, dentro de los cuales se tiene el dióxido de carbono agregado previamente, el agua y el monóxido de carbono puesto que se simuló una combustión incompleta de unos de los componentes del combustible. Todo lo anterior como lo muestra la Figura 12.

Figura 15.

Lista de componentes.

	Component ID	Type	Component name	Alias
▶	METHANE	Conventional	METHANE	CH4
▶	ETHANE	Conventional	ETHANE	C2H6
▶	PROPANE	Conventional	PROPANE	C3H8
▶	BUTANE	Conventional	N-BUTANE	C4H10-1
▶	PENTANE	Conventional	N-PENTANE	C5H12-1
▶	HEXANE	Conventional	N-HEXANE	C6H14-1
▶	OXYGEN	Conventional	OXYGEN	O2
▶	NITROGEN	Conventional	NITROGEN	N2
▶	ARGON	Conventional	ARGON	AR
▶	CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
▶	H2O	Conventional	WATER	H2O
▶	CO	Conventional	CARBON-MONOXIDE	CO

Nota. Lista de componentes presentes en la combustión.

Como siguiente paso se seleccionó el método de propiedades, el recomendado por el asistente de métodos del software fue el denominado Peng-Robinson basado en el uso y operación con hidrocarburos, por lo cual se fijó este como el método de propiedades en la simulación.

Con la selección del método se cumplieron las dos condiciones para terminar con la pestaña Properties y se continuó hacia el esquema del proceso del horno.

4.1.2 Esquema y programación del simulador.

Para comenzar con la programación del simulador se pasó a la pestaña Simulation, ya en la hoja de trabajo se procedió a definir las corrientes de entrada. Tal y como sucede en el horno real hay dos entradas, una definida como GASN corresponde al gas natural de entrada del horno y sus especificaciones a las mismas condiciones que se expone en el capítulo anterior y como se refleja en la Figura 13, otra definida como AIRH igualmente corresponde a la corriente de aire de

entrada a calentar en el horno y sus especificaciones se exponen en la Figura 14, así como en el capítulo anterior.

Figura 16.

Especificaciones GASN.

Flash Type: **Temperature** (dropdown), **Pressure** (dropdown)

State variables:

- Temperature: **K** (dropdown)
- Pressure: **mmHg** (dropdown)
- Vapor fraction:
- Total flow basis: **Mass** (dropdown)
- Total flow rate: **kg/hr** (dropdown)
- Solvent:

Reference Temperature:

- Volume flow reference temperature: **K** (dropdown)
- Component concentration reference temperature: **K** (dropdown)

Composition: **Mass-Frac** (dropdown)

Component	Value
METHANE	0,91
ETHANE	0,06
PROPANE	0,01
BUTANE	0,002
PENTANE	0,002
HEXANE	0,002
OXYGEN	
ARGON	
Total	1

Nota. La figura muestra las especificaciones para la corriente GASN

Figura 17.

Especificaciones AIRH.

Component	Value
METHANE	
ETHANE	
PROPANE	
BUTANE	
PENTANE	
HEXANE	
OXYGEN	0,20645
ARGON	0,00916

Total 1

Nota. La figura muestra las especificaciones para la corriente AIRH

Para continuar, se creó el equipo que simulará el horno, para este fin se seleccionó un reactor estequiométrico o **RStoic** como lo denomina el software y fue renombrado como **FURNACE** dentro de la simulación, este equipo realiza los cálculos de masa y energía correspondientes basado en la programación de las reacciones debidamente balanceadas y su posible factor de conversión, y se conectaron las corrientes **GASN** y **AIRH** a la entrada y la corriente **OUT** a la salida.

Dentro de las características a programar en el reactor, se definió la temperatura a 420 °C y presión a 1 atm como especificaciones de operación que definirán la corriente **OUT** al terminar la simulación y que corresponden a las características que se usaron en los cálculos del capítulo anterior.

Para agregar las reacciones al equipo, se programaron una por una adicionando la estequiometria expuesta en la **Tabla 20** y definiendo una conversión de 0.95 para las reacciones completas y de 0.00188 para la reacción incompleta del metano dando como resultado lo reflejado en la **Figura 18**.

Tabla 20.

Tabla estequiométrica de las reacciones

Combustible	Ecuación Balanceada
Metano	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
Etano	$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$
Propano	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$
Butano	$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$
Pentano	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$
Hexano	$C_6H_{14} + 9.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O$
Metano (Incompleta)	$2CH_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO + 4H_2O$

Nota. La tabla muestra las ecuaciones balanceadas de la combustión.

Figura 18.

Programación estequiométrica del simulador.

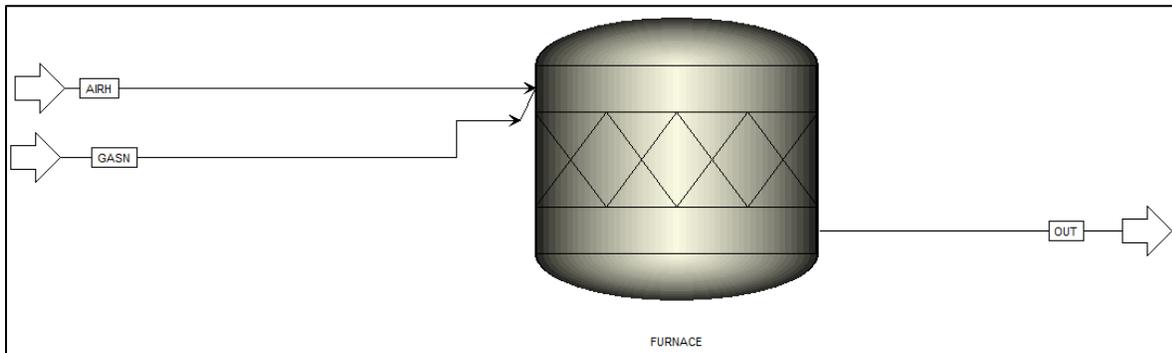
Reactions							
Rxn No.	Specification type	Molar extent	Units	Fractional conversion	Fractional Conversion of Component	Stoichiometry	
1	Frac. conversion		kmol/hr	0.95	METHANE	METHANE + 2 OXYGEN --> CO2(MIXED) + 2 H2O(MIXED)	
2	Frac. conversion		kmol/hr	0.95	ETHANE	ETHANE + 3.5 OXYGEN --> 2 CO2(MIXED) + 3 H2O(MIXED)	
3	Frac. conversion		kmol/hr	0.95	PROPANE	PROPANE + 5 OXYGEN --> 3 CO2(MIXED) + 4 H2O(MIXED)	
4	Frac. conversion		kmol/hr	0.95	BUTANE	BUTANE + 6.5 OXYGEN --> 4 CO2(MIXED) + 5 H2O(MIXED)	
5	Frac. conversion		kmol/hr	0.95	PENTANE	PENTANE + 8 OXYGEN --> 5 CO2(MIXED) + 6 H2O(MIXED)	
6	Frac. conversion		kmol/hr	0.95	HEXANE	HEXANE + 9.5 OXYGEN --> 6 CO2(MIXED) + 7 H2O(MIXED)	
7	Frac. conversion		kmol/hr	0.00188	METHANE	2 METHANE + 3 OXYGEN --> 2 CO(MIXED) + 4 H2O(MIXED)	

Nota. La figura muestra la estequiometría usada en el simulador.

Al finalizar se obtuvo el sencillo esquema que se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19.

Esquema general de la simulación.



Nota. La figura muestra el esquema general usado para el horno quemador en el simulador.

4.1.3 Resultados de la simulación.

Finalizada la programación se ejecutó la simulación y se obtuvo los siguientes resultados.

Figura 20.

Flujos másicos asociados a FURNACE.

	Units	AIRH	GASN	OUT
- Mass Flows	kg/hr	37000	314.374	37314.4
METHANE	kg/hr	0	286.081	13.7662
ETHANE	kg/hr	0	18.8625	0.943123
PROPANE	kg/hr	0	3.14374	0.157187
BUTANE	kg/hr	0	0.628748	0.0314374
PENTANE	kg/hr	0	0.628748	0.0314374
HEXANE	kg/hr	0	0.628748	0.0314374
NITROGEN	kg/hr	28471.1	3.14374	28474.3
CO2	kg/hr	11.1	1.2575	824.773
OXYGEN	kg/hr	7638.65	0	6468.93
ARGON	kg/hr	338.92	0	338.92
H2O	kg/hr	540.2	0	1191.58
CO	kg/hr	0	0	0.939045

Nota. La figura muestra los resultados obtenidos asociados a FURNACE.

Figura 21.

Características de operación del FURNACE.

Outlet temperature	420	C
Outlet pressure	560	mmHg
Heat duty	1,04911e+06	kJ/hr
Net heat duty	1,04911e+06	kJ/hr
Vapor fraction	1	

Nota. La figura muestra las características de operación resultantes de FURNACE.

La **Figura 20** muestra los flujos del horno, se puede apreciar que la suma de los flujos máxicos de las entradas **AIRH** y **GASN** dan como resultado el flujo de la salida **OUT** lo cual confirma las características de sistema abierto de flujo continuo y sin fugas que se esperan de un horno quemador. Para la corriente **OUT** los componentes asociados al combustible (metano, etano, propano, butano, pentano, hexano) y al comburente (oxígeno) se vieron reducidos y a su vez los componentes que se esperan como producto de las combustiones (agua, dióxido y monóxido de carbono) aumentaron, lo que refleja que se dio la combustión simulada, los inertes como el argón y el nitrógeno son solo la suma de las corrientes de entrada, por lo que no intervienen químicamente, y el compilado de todos resultados demuestra que la simulación se ejecutó de manera correcta y los resultados son veraces.

Se confirman que los resultados son veraces puesto que los valores que arroja el simulador son bastantes parecidos a los del balance masico dados por el capítulo anterior y congruentes con un proceso de combustión en donde la mayoría de los combustibles se consumen para generar dióxido de carbono (CO₂), una pequeña cantidad de monóxido de carbono (CO) para la combustión incompleta y nuevas cantidades de agua del mismo proceso de combustión, por otra parte, la afirmación de que la simulación se ejecutó de manera correcta es basada en los datos e información de control arrojados por el simulador en el cual no refieren ninguna falla o incongruencia en dichos datos o en los cálculos ejecutados por el mismo.

La **Figura 21** muestra las características de operación del horno **FURNACE** tal y como se programó, como resultado muestra carga neta con la que está operando, siguiendo las convenciones establecidas por el software la carga será positiva si se requiere energía adicional fuera del sistema para que dicho sistema opere, si es negativa el sistema estará liberando energía a su ambiente puesto que le sobra energía para operar, si es cero el sistema trabaja totalmente estable sin ningún flujo energético considerable. Como se muestra, la carga es positiva en un factor de 1'049.110 kilojulios cada hora, esto significa que teóricamente cada hora es necesario ingresar esa cantidad de energía adicional para que el sistema funcione correctamente. Teniendo en cuenta que se está trabajando con datos reales de un equipo real, estos resultados carecen de sentido puesto que el equipo funciona correctamente.

Dado que estos resultados se asemejan en cierta medida con los cálculos que se realizaron de forma manual a través de los balances de masa y energía del capítulo anterior se puede inferir que estos resultados se deben a alguna falta de veracidad en los datos de temperatura o flujo másico del aire que son los factores más importantes para tener en cuenta en los cálculos energéticos.

La Empresa señaló al proyecto que los flujos volumétricos del aire entrante pueden variar según los cambios de la temperatura de salida, todo esto para asegurar que la integridad del filtro de mangas que se encuentra posterior al proceso de secado en la torre sea óptimo, puesto que si la temperatura es muy baja, el vapor de agua se condensará humedeciendo el filtro y afectando su eficiencia, y si la temperatura es muy alta quemará el material del que está fabricado el filtro y deberá ser reemplazado inmediatamente, lo que supondrá un paro en las operaciones y conllevará a un incremento en el costo de operación.

Basado en lo anterior se realizarán unas suposiciones en el simulador, para asegurar que las afirmaciones de la Empresa van de acuerdo con la hipótesis del proyecto.

4.1.4 Suposiciones de simulación.

- Caso 1: Temperatura de operación.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores respecto a los balances de energía del sistema se modificó la temperatura de operación del horno dentro del simulador buscando obtener un panorama favorable. Para esta finalidad se disminuyó la temperatura de 420°C a 390°C sin modificar los demás parámetros del simulador. Esta modificación dio como resultado lo descrito en la **Figura 22**.

Figura 22.

Características del FURNACE en el caso 1.

Outlet temperature	390	C
Outlet pressure	560	mmHg
Heat duty	-191340	kJ/hr
Net heat duty	-191340	kJ/hr
Vapor fraction	1	

Nota. La figura muestra las características del FURNACE obtenidas para el caso 1 de simulación.

- Caso 2: Flujo de aire entrante.

Al igual que en el caso 1, buscando un resultado favorable, en esta suposición se modificó el flujo de entrada de aire atmosférico disminuyendo su factor de 37000 kg/h a 34000 kg/h sin modificar los demás parámetros del simulador. Este cambio dio como resultado lo expuesto en la **Figura 23**.

Figura 23.

Características del FURNACE en el caso 2.

Outlet temperature	420	C
Outlet pressure	560	mmHg
Heat duty	-194531	kJ/hr
Net heat duty	-194531	kJ/hr
Vapor fraction	1	

Nota. La figura muestra las características del FURNACE obtenidas para el caso 2 de simulación.

Para ambos casos el resultado fue favorable, y teniendo en cuenta que los cambios aplicados en ambos casos no fueron extremos y se pueden ajustar a la realidad, la teoría de la falta de exactitud en los datos ingresados al simulador se puede tomar en consideración, pero un estudio más profundo se sale de las limitaciones del proyecto.

De acuerdo con lo anterior, se puede suponer que el horno trabaja de forma correcta, sin ningún problema energético y puede proveer la operación de secado en cuanto al suministro de aire caliente.

4.2 Simulación de la torre de secado

4.2.1 Propiedades del simulador

Como en la simulación anterior, esta simulación inicio con una hoja en blanco, pero se llevó a cabo en el software Aspen HYSYS® a diferencia de dicha simulación anterior, se realizó esta selección diferente debido a la facilidad de este software para programar componentes de forma hipotética debido a que no se incluyen dentro del mismo.

A continuación, se seleccionó los componentes que se adicionarán en las corrientes de trabajo del equipo a simular. De acuerdo con los datos suministrados por la compañía, la corriente de salida del horno con sus características entra directamente a la torre de secado sin ninguna modificación o pretratamiento, siendo esto así los primeros componentes que se programaron fueron los 6 primeros hidrocarburos alcanos que se encuentran en proporción muy baja dentro de dicha corriente, continuando se agregaron los componentes resultantes de la combustión dentro del horno los cuales son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y el agua, este último componente también proviene de la corriente del detergente y es el componente clave de operación del secador, junto con estos componentes anteriores vienen el nitrógeno, el oxígeno y el argón, tomados del aire que intervino en la operación del horno quemador. Por otro lado, desde la corriente de entrada del detergente además del agua vienen unos componentes especiales que conforman el mayor porcentaje del detergente, no se pudo agregar en su totalidad el detergente puesto que algunos de los componentes no los incluye el simulador y aunque algunos fueron programados de forma hipotética para otros no se posee información fisicoquímica que permita esta programación por lo que no fueron adicionados a la simulación. Todo lo anterior como lo muestra la **Figura 22**.

Figura 24.

Lista de Componentes ingresados al simulador.

Component	Type	Group
LAS*	User Defined Hypothe...	HypoGroup1
Na ₂ CO ₃ *	User Defined Hypothe...	HypoGroup1
Na ₂ SiO ₃ *	User Defined Hypothe...	HypoGroup1
Methane	Pure Component	
Ethane	Pure Component	
Propane	Pure Component	
n-Butane	Pure Component	
n-Pentane	Pure Component	
n-Hexane	Pure Component	
Oxygen	Pure Component	
Nitrogen	Pure Component	
NA ₂ SO ₄	Pure Component	
H ₂ O	Pure Component	
CO ₂	Pure Component	
CO	Pure Component	
Argon	Pure Component	

Nota. La figura muestra los componentes ingresados para la simulación de la torre de secado.

Como siguiente paso se seleccionó el método de propiedades, el recomendado por el simulador fue NRTL por su veracidad con los componentes electrolíticos como los que se encuentran dentro del detergente.

Con la selección del método de propiedades finaliza las modificaciones dentro de la pestaña Properties y se avanza hacia el esquema del proceso.

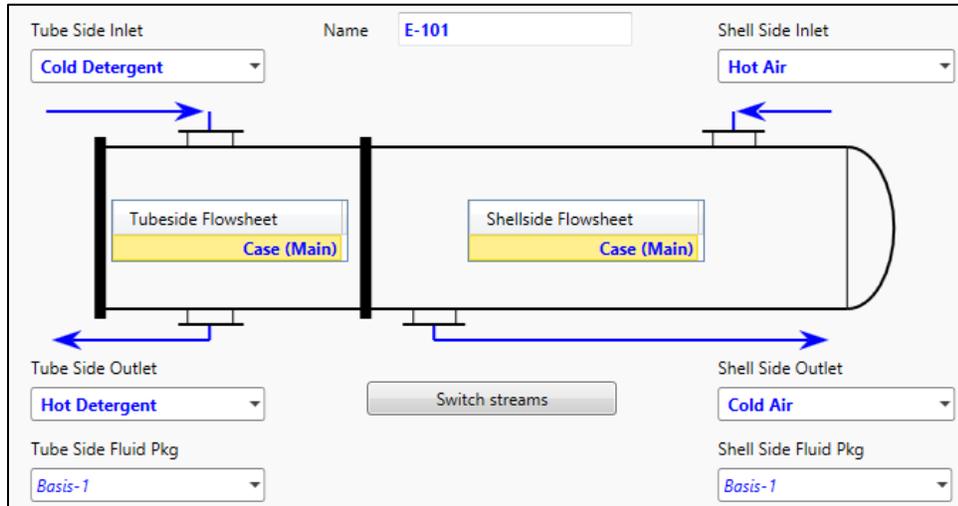
4.2.2 Esquema y programación del simulador.

Para comenzar con la programación en el simulador se pasa a la pestaña Simulation, de la misma forma que en la anterior simulación. Con la hoja de trabajo ya visible se comienza con definir el o los equipos que intervendrán en la simulación, aunque el simulador posee varios equipos para simular la torre de secado, estos solicitan datos de interacción o de diseño que no posee el proyecto por lo cual la forma más sencilla de abordar el secador es dividiéndolo en sus dos operaciones básicas, el intercambio de calor y la transferencia de masa siguiendo la metodología de la referencia [13], de esta manera se adicionaron a la hoja de trabajo un intercambiador de calor y un separador.

Iniciando con el intercambiador de primera forma se debe definir el nombre de las corrientes que intervienen dentro de él, tanto de entrada como de salida, los nombres definidos fueron para las entradas fueron **Hot Air** el cual corresponde a la corriente de aire caliente que salió del horno y entro al secador, y **Cold Detergent** que corresponde a la corriente de detergente que viene de la planta de producción después de la reacción de neutralización listo para ser secado, para las salidas los nombres asignados fueron **Cold Air** y **Hot Detergent**. Lo anterior se aprecia en la **Figura 25**.

Figura 25.

Diagrama básico del intercambiador de calor.



Nota. La figura muestra un diagrama básico del intercambiador de calor utilizado en la simulación.

El bloque intercambiador de calor viene con una programación definida, la cual se conservará así puesto que es la más sencilla y se ajusta a los datos que posee el proyecto, igualmente solicita datos de caídas de presión en diferentes puntos del mismo y se definieron como iguales a 0 por la simplicidad de la simulación y la inexistencia de dichos datos.

Con las corrientes ya nombradas el simulador las crea dentro de la hoja de trabajo y gracias a esto ya se pueden definir sus características, por consiguiente, se adicionan las propiedades de la corriente **Hot Air** con las características arrojadas por la simulación anterior y en el capítulo anterior tal como se muestra en la **Figura 26** y **Figura 27**, y la corriente **Cold Detergent** con las características suministradas por la empresa tal como se muestra en las **Figura 28** y **Figura 29**. Definidas esas dos corrientes se define la temperatura de salida de una de las 2 corrientes, en este caso **Cold Air** a 120 °C, y el simulador automáticamente ejecuta la simulación para arrojar el resultado de las otras dos corrientes, **Cold Air** y **Hot Detergent**.

Figura 26.

Propiedades de la corriente Hot Air.

Stream Name	Hot Air
Vapour / Phase Fraction	1,0000
Temperature [C]	420,0
Pressure [kPa]	74,66
Molar Flow [kgmole/h]	1313
Mass Flow [kg/h]	3,731e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	43,49
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-5683
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	218,8
Heat Flow [kJ/h]	-7,462e+006
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	<empty>
Fluid Package	Basis-1
Utility Type	

Nota. La figura muestra las propiedades de la corriente Hot Air.

Figura 27.

Composición de la corriente Hot Air.

	Mass Flows
LAS*	0,0000
Na ₂ CO ₃ *	0,0000
Na ₂ SiO ₃ *	0,0000
Methane	13,7662
Ethane	0,0314
Propane	0,0314
n-Butane	0,0314
n-Pentane	0,0314
n-Hexane	0,0314
Oxygen	6468,9300
Nitrogen	28474,3000
NA ₂ SO ₄	0,0000
H ₂ O	1191,8534
CO ₂	824,7418
CO	0,9391
Argon	339,0700
Total	37314,79515 kg/h

Nota. La figura muestra la composición de la corriente Hot Air

Figura 28.

Propiedades de la corriente Cold Detergent.

Stream Name	Cold Detergent
Vapour / Phase Fraction	0,1291
Temperature [C]	76,00
Pressure [kPa]	74,66
Molar Flow [kgmole/h]	229,3
Mass Flow [kg/h]	1,142e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1994
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	4,117e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	7,234e+004
Heat Flow [kJ/h]	9,442e+007
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	<empty>
Fluid Package	<i>Basis-1</i>
Utility Type	

Nota. La figura muestra las propiedades de la corriente Cold Detergent.

Figura 29.

Composición de la corriente Cold Detergent.

	Mass Flows
LAS*	1128,6300
Na ₂ CO ₃ *	923,3200
Na ₂ SiO ₃ *	884,3200
Methane	0,0000
Ethane	0,0000
Propane	0,0000
n-Butane	0,0000
n-Pentane	0,0000
n-Hexane	0,0000
Oxygen	0,0000
Nitrogen	0,0000
NA ₂ SO ₄	5386,8000
H ₂ O	3093,0175
CO ₂	0,0000
CO	0,0000
Argon	0,0000
Total	11416,08750 kg/h

Nota. La figura muestra la composición de la corriente Cold Detergent.

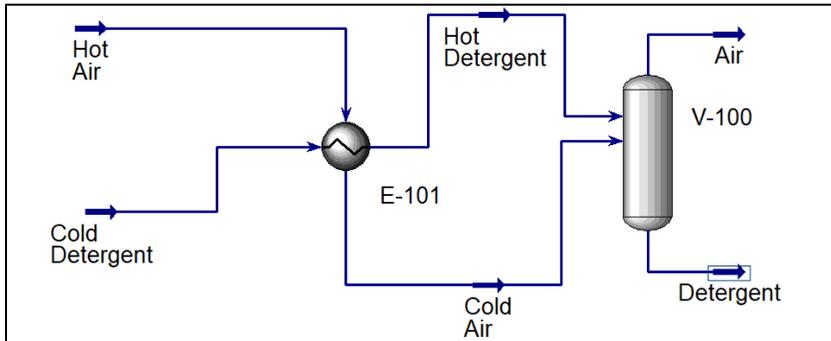
Con esta programación el simulador ya tiene el resultado de las otras dos corrientes y procedemos a programar el separador.

separador solo se necesita las corrientes de entrada, que en este caso serán las corrientes que salen del intercambiador **Hot Detergent** y **Cold Air** y nombrar las de salidas que serán **Detergent** para fondos y **Air** para cimbras, la caída de presión 0 y que solicite que calcule rápidamente las dimensiones del separador.

Finalmente, el esquema del proceso quedo como en la **Figura 30**.

Figura 30.

Esquema general del proceso de la torre de secado.



Nota. La figura muestra un diagrama general del proceso a utilizar en la simulación para la torre de secado.

Para revisar los resultados del proceso se remitirá a las corrientes **Air** y **Detergent** como lo muestran la **Figura 31** y **Figura 32**.

Figura 31.

Propiedades y composición de la corriente de salida Air.

Stream Name	Air		Mass Flows
Vapour / Phase Fraction	1,0000	LAS*	1077,7002
Temperature [C]	78,17	Na2CO3*	923,3196
Pressure [kPa]	74,66	Na2SiO3*	884,3199
Molar Flow [kgmole/h]	1491	Methane	13,7662
Mass Flow [kg/h]	4,308e+004	Ethane	0,9431
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2003	Propane	0,1572
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	7,881e+004	n-Butane	0,0314
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	1,113e+004	n-Pentane	0,0314
Heat Flow [kJ/h]	1,175e+008	n-Hexane	0,0314
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	<empty>	Oxygen	6468,9300
Fluid Package	Basis-1	Nitrogen	28474,3000
Utility Type		NA2SO4	2,2645
		H2O	3933,9545
		CO2	824,7418
		CO	0,9391
		Argon	339,0700
		Total	42944,50048 kg/h

Nota. La figura muestra las propiedades y composición de la corriente de salida Air.

Figura 32.

Propiedades y composición de la corriente de salida Detergent.

Stream Name	Detergent		Mass Flows
Vapour / Phase Fraction	0,0000	LAS*	50,9298
Temperature [C]	78,17	Na2CO3*	0,0004
Pressure [kPa]	74,66	Na2SiO3*	0,0001
Molar Flow [kgmole/h]	51,06	Methane	0,0000
Mass Flow [kg/h]	5652	Ethane	0,0000
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	34,41	Propane	0,0000
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-5,985e+005	n-Butane	0,0000
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	5647	n-Pentane	0,0000
Heat Flow [kJ/h]	-3,056e+007	n-Hexane	0,0000
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	<empty>	Oxygen	0,0000
Fluid Package	Basis-1	Nitrogen	0,0000
Utility Type		NA2SO4	5384,5355
		H2O	350,9164
		CO2	0,0000
		CO	0,0000
		Argon	0,0000
		Total	5786,38216 kg/h

Nota. La figura muestra las propiedades y composición de la corriente de salida Detergent.

Los resultados arrojados por la simulación del proceso no son los esperados como muestran la **Figura 31** la corriente **Air** no posee la temperatura correcta de salida y en sus flujos masicos se aprecia que está arrastrando la gran mayoría de los componentes del detergente, lo cual carece totalmente de sentido. Igualmente, la **Figura 32** correspondiente a la corriente **Detergent** también confirma el resultado desalentador con una temperatura diferente a la esperada y exactamente igual a la de la corriente **Air**, y la carencia de los componentes del del detergente.

El proyecto busco alternativas para la solución de este resultado fallido, pero no encontró ninguna dentro de los límites de estudio del proyecto y la limitada información que se posee del proceso de la torre de secado. Dentro de las recomendaciones se abordó que posibles soluciones se podrán ejecutar.

Cabe resaltar que la empresa no mostro ninguna inconformidad con este resultado del proyecto y recibió de manera positiva las recomendaciones que el proyecto expreso referente a este tema.

CONCLUSIONES

Para el primer objetivo se encontró que las propiedades evaluadas de densidad y humedad del detergente entrante a la torre secado corresponden a las esperadas, es decir, un fluido viscoso más denso que el agua por su contenido de sólidos. Igualmente, su capacidad calorífica supera a la del agua debido a su composición mayormente de sales en mezcla homogénea con el agua y un contenido de humedad similar al reportado por la empresa.

En el desarrollo del segundo objetivo se evidenció un consumo de gas natural elevado debido a la cantidad de aire que se ingresa al horno quemador, por consiguiente, se utilizó un dato promedio de la Empresa para la realización del balance de masa obteniendo valores similares a los datos de emisiones suministrados por AzulK S.A. Al realizar los respectivos balances energéticos de los equipos participantes en el proceso de secado se encontró que la Empresa al tener exceso del flujo de aire requiere de más energía que la proporcionada por la combustión para cumplir con las condiciones de salida del quemador. Ahora en la torre de secado de detergente en polvo se evidenció una pérdida elevada de energía al ambiente puesto que es un sistema abierto, además de esto la energía contenida en la corriente entrante de aire excede la necesaria para evaporar el agua contenida en el lodo.

En el tercer objetivo se comprobó lo mencionado en el segundo objetivo respecto al balance de materia del horno quemador y su eficiencia energética, aun así con ayuda de algunas herramientas del simulador y, correcciones y aclaraciones suministradas por la Empresa se simularon casos posiblemente reales en donde la eficiencia energética del horno quemador es prometedora, es decir, que el horno tiene la suficiente capacidad de entregar el aire de salida a las condiciones que requiere la operación de secado de la torre. Finalmente, la simulación de la torre de secado se llevó a cabo, pero con resultados no prometedores puesto que el sistema es demasiado complejo y para su correcta ejecución el simulador solicita datos que la Empresa no posee, que no se pueden obtener empírica e igualmente no se pueden suponer. La Empresa aun así no mostró inconformidad respecto a lo mencionado anteriormente por los resultados favorables del segundo objetivo.

En resumen, se considera que el proyecto ejecuto totalmente todos sus objetivos y considera que la empresa AZULK S.A.S. se encuentra operando de forma totalmente correcta la torre de secado dentro de las flexibilidades que la operación permite. El horno suple de manera correcta con los requerimientos de secado de la torre y el alto consumo de gas natural se debe a la alta carga de aire que ingresa a la torre la cual para su calentamiento si requiere dicha cantidad de gas natural. Se resaltan recomendaciones energéticas que facilitaran y/o mejoraran la operación de dicha torre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. McCabe, J. Smith and P. Harriot, Operaciones unitarias en ingeniería química (7a. ed.), 7th ed. McGraw-Hill Interamericana, 2000.
- [2] C. Geankoplis, Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4th ed.
- [3] C. Geankoplis, Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3rd ed. México: CECSA, 1999, p. 603.
- [4] H. Shukor, S. Ku Ismail and H. Johar, ERT 214 MATERIAL AND ENERGY BALANCE HYSYS SIMULATION MANUAL. UNIVERSITI MALAYSIA PERLI.
- [5] "Simuladores de Procesos - EcuRed", Ecured.cu. [En Línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Simuladores_de_Procesos. [Consultado el: 29 de Ago, 2019].
- [6] "FUNDAMENTOS DE QUÍMICA-PRÁCTICA 5. CALORIMETRÍA", Upo.es. [En Línea]. Disponible en: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/quimbiotec/FQpractica5.pdf>. [Consultado el: 24 de Ene, 2021].
- [7] "CAPACIDAD CALORÍFICA DE UN CALORÍMETRO Y CALOR ESPECIFICO DE UN SÓLIDO", Fisica.ucn.cl, 2016. [Online]. Disponible en: <http://www.fisica.ucn.cl/wp-content/uploads/2018/03/CAPACIDAD-CALORIFICA.pdf>. [Consultado el: 24 de Ene, 2021].
- [8] NTC 1776 – Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados, ICONTEC, Bogotá, 2019.

- [9] C. Barrera Puigdollers, N. Betoret Valls, M. Castelló Gómez and E. Pérez Esteve, Principios Básicos de la Combustión, 1st ed. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [10] "CLIMA - IDEAM", Ideam.gov.co. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>. [Consultado el: 30 de Ago, 2019].
- [11] Y. Çengel and M. Boles, Termodinámica, 7th ed. México: McGraw-Hill, 1998, p. 912, 948.
- [12] J. L. Llanes, L. Zumalacárregui de Cárdenas, and O. Pérez Ones, "Evaluation of the powder detergent production process from simulation", *rev.ing.univ.Medellin*, vol. 15, no. 28, pp. 241-260, Dic. 2015
- [13] J. S. Bonilla Martínez, *Dimensionamiento de un reactor para la producción del detergente líquido autopolish a nivel industrial en la empresa Produquum LTDA*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2017.
- [14] J. Cabrera, "DETERGENTE EN POLVO- PROCESOS INDUSTRIALES I", prezi.com, 2013. [En Línea]. Disponible en: <https://prezi.com/jqey7lr8zu75/copy-ofdetergente-en-polvo-procesosindustriales-i/>. [Consultado el: 24 de Ago, 2019].
- [15] I. Marcelo Reyes, Secadores, 1st ed. México: Dependencia Académica de Ciencias Químicas y Petroleras. [En Línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/30244923/Operaciones_Unitarias_Secadores
- [16] W. MacCabe, J. Smith and P. Harriott, Operaciones unitarias en ingeniería química, 7th ed. Madrid: MacGraw-Hill, 2000, p. 832.

- [17] P. I. Urjilez Vasquez, *Diseño de un sistema de descarga de polvo fino detergente en una planta de 12 ton/h*, tesis pre. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela superior politécnica Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [18]"¿Qué es? - Grupo Vanti", Grupo Vanti. [En Línea]. Disponible en: <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>. [Consultado el: 16 de Ene, 2019].
- [19] "El proceso de secado por pulverización | Eurotherm by Schneider Electric", Eurotherm by Schneider Electric. [En Línea]. Disponible en: <https://www.eurotherm.com/es/life-sciences-cpg-processes-applications-es/the-spray-drying-process/>. [Consultado el: 06 de Oct, 2019].
- [20]"Spray Process", Sprayprocess.com.br, 2009. [En Línea]. Disponible en: <https://www.sprayprocess.com.br/secador-atomizador>. [Consultado el: 16 de Jul, 2019].
- [21] G. Gil, "Obtención de detergente en polvo", Upcommons.upc.edu, 2021. [En Línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12877/Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Consultado el: 06 de Ago, 2019]
- [22]"CALORIMETRIA", Universidad de Salamanca [En Línea]. Disponible en: <http://campus.usal.es/~quimfis/apoyo/Cachaza/Personal/practicas/CALORIMETRIA>. [Consultado el: 24 de Ene, 21].
- [23] "PRINCIPIOS DE TERMOQUÍMICA", Universidad de los Andes de Venezuela. [En Línea]. Disponible: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16744/termoquimica.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consultado el: 18 de Ago, 19].

RECOMENDACIONES

En el caso de la experimentación, se facilita la obtención del calor específico de cualquier fluido complejo al utilizar la calorimetría ya que, en ocasiones, realizar el cálculo matemático por contribución de especies se dificulta debido a los componentes del fluido y además se obtiene un valor experimental aproximado de la mezcla en sí. Ahora para el cálculo de la densidad de fluidos muy viscosos es recomendable no utilizar el picnómetro por su difícil manejo, se recomienda como un elemento alternativo a esta medición un densímetro para la precisión de esta medida y una probeta graduada en caso de poder obtener el elemento anterior ya que al necesitar una relación masa-volumen la probeta facilita la medición del volumen. En cuanto a la humedad, se obtiene de manera más precisa al usar recipientes con mayor área mejorando el proceso de secado. Teniendo en cuenta lo anterior se recomienda realizar varios ensayos para disminuir el error de dichas mediciones y detallar la respectiva incertidumbre para cada caso.

En los balances de materia en la torre y el horno, un estudio en sitio ayudaría plenamente en el alcance de objetivos puesto que observar la producción por lotes asegura tener datos en directo y permitir su respectivo análisis, así como desarrollar varias iteraciones asegurando una mejor efectividad de los datos obtenidos. Todo esto se obtiene con colaboración de la empresa, acceso al proceso de forma total y apoyo de personal calificado que permita una guía adecuada de todos los cálculos y observaciones.

Luego de desarrollar la evaluación energética del proceso de secado de detergente en polvo de la empresa AZULK S.A.S. se evidenciaron posibilidades de mejora al trabajar directamente en el horno quemador. Una de las recomendaciones para la mejora comprende el aislamiento del tubo de salida del horno, manteniendo una temperatura más constante a la entrada del aire de secado evitando pérdidas de energía en este sector. De ser posible, realizar un pretratamiento al aire de entrada al horno quemador aumentando su temperatura con un intercambiador de servicio con el fin de disminuir la energía requerida para cumplir con las condiciones de salida, influyendo en un menor consumo de gas natural. Por otro lado, si es factible disminuir la humedad del detergente base sin afectar sus propiedades ni su flujo por la torre, esto incurriría en menor energía requerida para evaporar el agua contenida en el lodo desembocando en una disminución del gas natural requerido.

Para el desarrollo de la simulación de la torre de secado del detergente es necesario realizar un estudio técnico profundo sobre el diseño de la torre de secado y la composición del detergente para determinar las características que el simulador requiere para su correcta ejecución, estas incluyen las dimensiones y propiedades de la torre, y las características fisicoquímicas y moleculares de todos los componentes del detergente.

Cabe resaltar que dichos datos que se requieren incluyen altura, diámetro, material de la torre, tipo y número de boquillas de aspersión, ángulo de aspersión, diámetro de boquillas altura efectiva de trabajo de la torre, es decir la distancia real en la que se realiza las transferencias de masa y energía, datos de incrustación de la torre, averiguar si se efectúa un vacío dentro de la torre, datos masicos completos de la salida de aire de la torre, curva de secado con función definida y formulación de partícula. Para el detergente es necesario encontrar tablas de características fisicoquímicas de cada componente del detergente, siendo ejemplos el punto de fusión, de ebullición, interacciones binarias (si se requieren), estructuras moleculares, presión crítica, densidad, viscosidad, entalpías y calores específicos, entre otras más.

Para ese estudio técnico igualmente se recomienda un apoyo total de la empresa, disponibilidad amplia de tiempo y laboratorios especializados en la caracterización de los materiales que se usan para la fabricación del detergente, igualmente la empresa deberá permitir el acceso sin restricciones a estos materiales con su debida confidencialidad.