


|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-27 |

# **DISEÑO PROPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SULFATO DE COBRE**

Haiver Andrés Hincapié Mejía

Ingeniería Electromecánica

Juan Gonzalo Ardila Marín

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO  
MEDELLIN 2016**

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

# RESUMEN

---

El objeto del presente trabajo es diseñar un sistema de automatización para el proceso de sulfato de cobre de la compañía Productos Químicos Panamericanos S.A. planta Girardota, que permita controlar el consumo energético necesario para la producción, este diseño busca la disminución de los costos y tiempos para la obtención del producto final.

Para su desarrollo se siguió la siguiente metodología: 1. Estudiar y entender el proceso de fabricación del Sulfato de Cobre. 2. Caracterizar las variables a medir dentro del proceso a mejorar, que inciden en consumos energéticos y tiempos. 3. Cuantificar el consumo de energía en los equipos que intervienen en el proceso. 4. Modelar una posible solución a partir de teorías o métodos utilizados para realizar los cálculos requeridos, y comparar los resultados obtenidos contra datos medidos en el sistema actual, y por último. 5. Elaborar memorias de diseño a raíz de los resultados finales arrojados por el proceso.

Del estudio y caracterización del proceso se identificaron las ineficiencias con las que convive como son: 1. La sub-utilización de la caldera. 2. La cantidad y calidad de aire comprimido. 3. El no aprovechamiento del calor exotérmico de la reacción: en el caso de la caldera se comprueba que está trabajando por debajo de su capacidad nominal para generar vapor y que no está siendo operada de manera adecuada, se verifica en ella una carga del 20% de su capacidad equivalente 1200 lbm/h de vapor contra 6600 lbm/h, con una eficiencia térmica del 42%. De igual forma se verifica que el aire comprimido que está ingresando a la reacción están muy por encima de las condiciones necesarias para la oxidación de la mezcla, se ingresan 250CFM @ 100 psig cuando la reacción se basta con 110CFM @ 70psig. Adicionalmente, tampoco se está teniendo en cuenta la energía que libera en forma de calor el ácido sulfúrico al entrar en contacto con el agua en el medio de reacción, que resulta ser de 16000W, suficiente para limitar el aporte de calor del vapor proveniente de la caldera de manera representativa.

El modelamiento del sistema se llevó a cabo con la herramienta Matlab R2014b® gracias a su módulo SimuLINK® que permitió el ingreso del sistema de 10 ecuaciones constitutivas para la primera etapa del proceso y 22 ecuaciones para la segunda etapa, permitiendo la iteración de diferentes parámetros de funcionamiento del proceso, y llevando a los siguientes resultados: gráficas de temperatura, concentración de ácido, concentración de sulfato de cobre y concentración de cobre contra el tiempo durante cuatro horas.

Finalmente se propone un sistema de control de temperatura y adición de ácido, diseñado con el software Simatic STEP7®, que puede representar un ahorro en energía térmica de 7.344.000 \$, en energía eléctrica de 3.638.320 \$ y en los costos de mano de obra por reacción de 862.500 \$. Estos valores son de gran impacto para la compañía. También se justifica la necesidad de sustituir o

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

destinar solo para este proceso otro tipo de compresor que suministre aire comprimido a menor costo y con las especificaciones requeridas.

Palabras clave: Sulfato de cobre, Reacción exotérmica, Proceso isoentálpico, Caldera piro tubular, Compresor de tornillo, Sistema de control.

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

## RECONOCIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que con su ayuda han contribuido en el desarrollo de este trabajo, en especial a mi asesor el Ingeniero Juan Gonzalo Ardila quien ha realizado el seguimiento y supervisión continua del proyecto.

Especial reconocimiento al ingeniero John Fernando Arias quien presento interés por mi trabajo y realizo aportes de gran importancia para el desarrollo del proyecto.

También quiero dar las gracias a mi madre Norha Mejía y mi esposa Yineth Guzmán, quienes siempre durante el transcurso de mí carrera brindaron ese apoyo incondicional, por su comprensión paciencia y ánimo recibido.

A todos, muchas gracias.

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

## TABLA DE CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | INTRODUCCIÓN.....   | 8  |
| 1.1.  | Generalidades.....  | 8  |
| 1.2.  | Objetivos.....  | 8  |
| 1.3.  | Organización de la tesis .....                                  | 9  |
| 2.    | MARCO TEÓRICO.....  | 10 |
| 2.1   | Descripción proceso.....  | 10 |
| 2.2   | Trabajo de flujo y entalpía .....                               | 11 |
| 2.3   | Termo economía.....   | 12 |
| 2.4   | Gestión energética.....   | 12 |
| 2.5   | Auditoria energética .....                                      | 13 |
| 2.6   | Sistema de control .....  | 13 |
| 2.6.1 | Software Step 7®.....   | 13 |
| 2.6.2 | Configuración y parametrización del hardware .....              | 13 |
| 2.6.3 | Parametrización de la CPU.....                                  | 14 |
| 2.6.4 | Parametrización del módulo.....                                 | 14 |
| 2.6.5 | Especificación de la comunicación .....                         | 14 |
| 2.6.6 | Programación.....   | 14 |
| 2.7   | Utilización Matlab R2014b® .....                                | 14 |
| 2.8   | Equipos aire comprimido.....                                    | 15 |
| 2.8.1 | Definición y clasificación según los principios de trabajo..... | 15 |
| 2.8.2 | Compresor de tornillo.....                                      | 15 |
| 2.9   | Consumo energético motores de inducción.....                    | 16 |
| 3     | METODOLOGÍA .....   | 17 |
| 3.1   | Estudio del proceso .....                                       | 17 |
| 3.1.1 | Proceso químico etapa 1 .....                                   | 17 |
| 3.1.2 | Proceso químico etapa 2 .....                                   | 22 |
| 3.2   | Análisis equipos aire comprimido.....                           | 28 |
| 3.3   | Análisis eficiencia térmica caldera.....                        | 28 |
| 3.4   | Caracterización de las variables.....                           | 30 |
| 3.4.1 | Cantidad de oxígeno necesario para la reacción .....            | 30 |

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

|       |  |           |
|-------|--|-----------|
| 3.4.2 | Tiempos necesarios para la obtención del producto .....                            | 30        |
| 3.4.3 | Cantidad de energía liberada en la reacción .....                                  | 30        |
| 3.4.4 | Flujo de calor necesario para llevar a cabo la reacción .....                      | 30        |
| 3.4.5 | Calculo consumo de vapor requerido.....  | 30        |
| 3.4.6 | Rangos de presión y temperatura de trabajo necesarios para el proceso              | 31        |
| 3.5   | Determinación de los equipos necesarios para el suministro de aire comprimido..... | 31        |
| 3.6   | Cuantificación del consumo de energía.....   | 31        |
| 3.7   | Energía térmica ingresada al proceso.....  | 32        |
| 3.8   | Energía ingresada al proceso actualmente.....                                      | 32        |
| 3.9   | Costos energéticos y tiempos de producción.....                                    | 32        |
| 3.10  | Eficiencia del proceso actual .....  | 32        |
| 3.11  | Modelamiento de la solución al problema.....                                       | 33        |
| 4     | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>34</b> |
| 4.1   | Resultados estudio del proceso.....  | 34        |
| 4.1.1 | Proceso químico Etapa 1 .....  | 34        |
| 4.1.2 | Proceso químico Etapa 2 .....  | 38        |
| 4.2   | Análisis equipos aire comprimido.....  | 42        |
| 4.3   | Resultados Análisis eficiencia térmica caldera .....                               | 43        |
| 4.4   | Caracterización de las variables.....  | 48        |
| 4.4.1 | Tiempos necesarios para la obtención del producto .....                            | 49        |
| 4.4.2 | Cantidad de energía liberada en el medio.....                                      | 49        |
| 4.4.3 | Flujo de calor necesario para llevar a cabo la reacción .....                      | 49        |
| 4.5   | Calculo consumo de vapor requerido.....  | 50        |
| 4.6   | Determinación de los equipos necesarios para el suministro de aire comprimido..... | 50        |
| 4.7   | Rangos de presión y temperatura de trabajo necesarios para el proceso              | 50        |
| 4.8   | Cuantificación del consumo de energía.....   | 50        |
| 4.9   | Energía ingresada al proceso actualmente.....                                      | 50        |
| 4.10  | Costos energéticos y tiempos de producción.....                                    | 51        |
| 4.11  | Eficiencia del proceso actual .....  | 53        |
| 4.12  | Modelamiento de la solución al problema.....                                       | 54        |
| 5     | <b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>                        | <b>56</b> |
|       | <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>57</b> |

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

|   |    |
|---|----|
| ANEXOS.....   | 58 |
| Anexo A. Datos técnicos caldera .....                   | 58 |
| Anexo B. Ficha técnica carbón.....                      | 58 |
| Anexo C. Esquema programación etapa 1 .....             | 59 |
| Anexo D. Esquema programación etapa 2 .....             | 62 |
| Anexo E. Diagrama de flujo planta sulfato de cobre..... | 69 |
| Anexo F. Sistema control de temperatura .....           | 69 |
| Anexo G. Sistema control conductividad eléctrica.....   | 71 |

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Generalidades

En la actualidad la explotación de los recursos energéticos va en aumento, lo cual preocupa a la población mundial ya que dichos recursos son limitados, por tal motivo se han venido desarrollando campañas por parte de grandes empresas generadoras de energía eléctrica donde se presentan proyectos para educar a las compañías respecto al manejo adecuado de la energía en todos sus manifestos. Si se cuenta con un sistema de gestión energética bien estructurado dentro de la organización la empresa podrá ser competitiva en el medio y tendrá como beneficio bajos costos representados en la energía que está consumiendo, ya que a las compañías generadoras les conviene proveer los recursos energéticos necesarios a empresas que son autosuficientes para que puedan tener una gran trayectoria en el tiempo. Todo lo contrario a las empresas que por el mal manejo a los recursos entran en un estado crítico, incluso llevándolas a la quiebra.

El estudio será enfocado en uno de los procesos de la empresa **Productos Químicos Panamericanos S.A** planta Girardota, la producción de sulfato de cobre, el cual es uno de los productos fundamentales que se realiza en la planta. Debido a que la materia prima para este proceso es el cobre insumo que por sus propiedades es costoso para todos sus usos, se crea la necesidad de optimizar el proceso para reducir el costo en la producción.

En la actualidad el consumo de energía está en un crecimiento constante, por ende la tendencia es enfocar los procesos para que sean desarrollados de la manera más eficiente posible, por tal motivo lo que se pretende con el estudio es generar conciencia en todos los miembros partícipes de la organización para que puedan adquirir compromisos y responsabilidades sobre el manejo adecuado de los recursos energéticos, Demostrando el gran impacto que representan en la rentabilidad de los productos y la importancia que tiene apoyar y financiar este tipo de estudios para que se puedan implementar en las demás plantas y llevar a la compañía a un nivel de excelencia y de sostenibilidad respecto al manejo adecuado de los recursos disponibles.

## 1.2. Objetivos

Por lo tanto se propone diseñar un sistema de control para el proceso que permita medir el consumo energético necesario para la producción, para lo cual se planea estudiar y entender el proceso de fabricación del Sulfato de Cobre, caracterizar las variables a medir dentro del proceso a mejorar, las que inciden en consumos energéticos y tiempos. Luego cuantificar el consumo de energía en los equipos que intervienen en el proceso, para modelar una posible solución al problema planteado a partir de teorías o métodos utilizados para realizar los cálculos requeridos, y comparar los resultados obtenidos contra datos medidos en el sistema actual, y al final elaborar memorias de diseño a raíz de los resultados finales arrojados por el modelo.



|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

### **1.3. Organización de la tesis**

El segundo capítulo, llamado marco teórico, presenta la descripción del proceso productivo a intervenir, las definiciones de trabajo de flujo y entalpía, la descripción técnica de los equipos que intervienen el proceso y la conceptualización de cómo se midió y estableció la eficiencia de dichos equipos. Se presentan además los programas empleados en el modelamiento del proceso y en el diseño del sistema de control.

El tercer capítulo es Metodología, allí se describe todo el análisis estequiométrico del proceso de reacción, los balances de masa y energía, el método experimental de determinación de la eficiencia energética de la caldera y del compresor además se describe el procedimiento de uso del software Matlab R2014b® para la simulación del proceso y del software Simatic STEP7® para el diseño del sistema de control.

El cuarto capítulo: Resultados, presenta los hallazgos alcanzados en cada fase metodológica descrita en el capítulo anterior, siguiendo el mismo orden del planteamiento, allí se encontrará la solución del sistema de ecuaciones para cada etapa del proceso, las gráficas más representativas con los resultados de la caracterización del proceso actual y la simulación de la propuesta final del presente proyecto, además se discuten los resultados de la evaluación térmica de los equipos involucrados y los costos de operación de los mismos. Para finalizar se reportan las principales conclusiones, recomendaciones y se propone el trabajo siguiente a la ejecución de este proyecto.

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

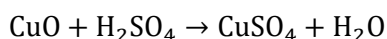
## 2. MARCO TEÓRICO

---

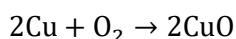
### 2.1 Descripción proceso

Productos Químicos Panamericanos S.A es una empresa colombiana fundada en 1974 como resultado de la asociación entre la compañía norteamericana PQ Corporation® de Valley Forge® en Pennsylvania e inversionistas privados colombianos. La compañía se creó con el objeto de procesar, distribuir e importar materias primas y exportar una amplia gama de productos químicos. Uno de los procesos que se lleva a cabo en la planta PQP Girardota es el de sulfato de cobre pentahidratado el cual se usa en tratamiento de agua como alguicida, en fabricación de concentrados alimenticios para animales, en la industria del acero, medicina, preservantes de la madera entre otros y su obtención se describe a continuación.

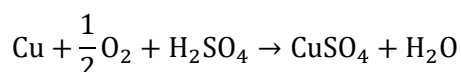
El sulfato de cobre se produce a partir de una reacción entre ácido sulfúrico y óxido de cobre, así (Ludwig, 2001):



Debido a la dificultad de tener óxido de cobre como materia prima, éste se obtiene in situ (en el medio de reacción) mediante un procedimiento de oxidación con aire sobre cobre metálico y sus aleaciones (básicamente bronce y latón). Por tanto se requiere inicialmente facilitar la siguiente reacción (Ludwig, 2001):



Obteniendo Como reacción final (Ludwig, 2001):



Aunque la adición constante de ácido sulfúrico como reactivo limitante de la reacción permite el aprovechamiento de su calor de disolución, la energía de activación de la misma requiere el suministro constante de energía calórica para facilitar la conversión hacia sulfato de cobre y disminuir los tiempos de reacción. Siendo en muchos casos necesario mantener la reacción en su punto de ebullición (Rosseau, 2004).

En la actualidad la competencia a nivel industrial va en aumento, cada día los productos tienden a ser fabricados por una gran cantidad de empresas las cuales a partir de las diversas formas de fabricación de estos productos químicos buscan la manera de reducir los costos de producción al menor valor posible. La producción de sulfato de cobre se puede obtener a partir de la oxidación de forma natural del cobre estando en contacto con el agua y el ácido sulfúrico pero para que este proceso se lleve a cabo se necesita disponer de tiempos muy prolongados, por tal motivo se opta por ingresar a la reacción vapor sobrecalentado y aire comprimido los cuales aceleran la oxidación

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

del cobre para convertirse en sulfato de cobre mediante una reacción posterior con ácido sulfúrico. Los requerimientos energéticos en el proceso son suministrados para la optimización de la mano de obra y la disminución de los tiempos de reacción, con el objeto de aumentar la capacidad instalada de la planta. Estos requerimientos energéticos son asignados actualmente sin un estricto análisis de las condiciones energéticas óptimas que permiten un balance favorable en el costo del producto, incluyendo los costos de materiales, mano de obra, energía y costos fijos. Por ende, se supone un consumo de energía y mano de obra muy por encima de los valores que el proceso requiere, esto conlleva a que la rentabilidad asociada a la venta del producto se encuentre reducida y fijada por la demanda de producto disponible tanto en empresas nacionales como extranjeras.

De acuerdo a los conocimientos adquiridos en la Universidad al cursar materias como; física mecánica, gestión energética, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, máquinas térmicas entre otras se presentan a continuación algunas formas prácticas en las que se maneja la energía y como se expresan, estas nos serán de gran utilidad para poder desarrollar el proyecto.

## 2.2 Trabajo de flujo y entalpía

Para establecer el consumo energético, primero es necesario definir que la energía es la fuente de todos los movimientos, dando dinamismo y vida a los sistemas por medio del efecto de fuerzas potenciales, la energía se presenta de múltiples formas, siendo el calor la más intuitiva de todas. Esta se presenta como energía en movimiento a través de las fronteras de los sistemas, impulsada por la diferencia de temperatura entre el sistema y el ambiente que lo rodea, para tener mayor claridad se puede definir el calor como el flujo de energía asociado con la diferencia de temperatura entre dos zonas del espacio (Holman, 1999).

En las zonas de entrada y de salida de flujo se genera un trabajo producido por las presiones que allí existen, las cuales hacen una fuerza sobre las masas que se desplazan por dichas áreas. Este trabajo, por unidad de masa, es igual al producto de la presión por el volumen específico,  $p v$  o  $p/\rho$ , donde  $\rho$  densidad. Viene a ser el trabajo que hace fluir las sustancias en las zonas por las que ellas entran o salen al sistema.

La entalpía  $h$ , es la suma de la energía interna más el trabajo de flujo.

$$h = u + p v$$

Como la presión y el volumen específico son ambas propiedades de las sustancias, su producto también lo es y por ello la entalpía es así mismo una propiedad. En la literatura se encuentra en las tablas de propiedades de las distintas sustancias, como función de la temperatura y de la presión. Al observar dichas tablas se advierte que depende casi linealmente de la temperatura y esta menos influenciado por la presión, lo que se explica mediante la siguiente expresión:

$$\Delta h = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

Donde  $m$  es el flujo de masa, el cual está cambiando su entalpia,  $\Delta T$  es el cambio de temperatura  $C_p$  es el calor específico medio a presión constante (Yunus A. Cengel), (Holman, 1999).

### 2.3 Termo economía

La termo-economía aborda los temas de costes, bien monetarios (\$/KJ) o puramente energéticos (KJ de recurso/KJ de producto), y se utiliza principalmente para la contabilidad, diagnóstico, mejora, diseño y optimización de sistemas térmicos. Según la opinión del autor abarca más, es la ciencia en la que la termodinámica y en particular el segundo principio se une con la economía, ambas en un sentido amplio. Ahora estamos en el principio y esta ciencia se construirá con las aportaciones de muchos autores, no solo ingenieros mecánicos. En el mundo habrá que poner orden y sistemática a la gran cantidad de contribuciones que tanto economistas como físicos, Biólogos, Químicos o ingenieros quieren encontrar en las analogías y explicaciones entre la termodinámica y la Economía.

Vivimos en un mundo finito y pequeño para la gente que somos y seremos. Y los recursos naturales son un bien escaso. Si queremos sobrevivir Debemos concientizarnos y aprender a conservarlos mejor y en este propósito la termo-economía jugará un papel clave. Debemos conocer los mecanismos por los cuales la energía y los recursos en general se degradan y debemos también aprender y enseñar a juzgar qué sistemas trabajan mejor con objeto de mejorar sistemáticamente los diseños y reducir el consumo per cápita (El-Sayed, 2003).

### 2.4 Gestión energética

La puesta en marcha de un programa de gestión energética para las buenas prácticas de manejo de energía en la industria siempre trae consigo ahorros de energía y mayor rentabilidad en las operaciones de la empresa. La realización de estas prácticas requiere en general de cierto nivel de entrenamiento, personal calificado, un buen mantenimiento de los equipos y un registro detallado de los consumos. Las buenas prácticas y la racionalización de los consumos de energía se refieren a acciones concretas sobre los equipos de la empresa en los que se quieren lograr ahorros.

Es importante contar con un cierto entendimiento de la primera y de la segunda ley de la naturaleza (primera y segunda ley de la termodinámica), dado que gobiernan los procesos energéticos y brindan las herramientas para aproximarse a la medición de las eficiencias, algunos conceptos a continuación serán descritos (Restrepo, 2014): La ley de la conservación de la energía, es la primera ley de la termodinámica, en ella se establecen las relaciones entre los flujos de energía que experimenta un sistema físico y la forma en que cambian las propiedades que definen el estado de las sustancias que hacen parte del sistema. La segunda ley, de extrema importancia, fija los límites y direcciones a los procesos de intercambio energético, señala hasta donde se puede llegar en las eficiencias de trabajo. Todos los procesos transforman la energía modelando la naturaleza, una de las consideraciones más importantes de la primera ley es que al entrar y salir energía de un sistema, se presenta cambio de energía interna, en la práctica esto

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

significa que las masas se calientan y se enfrían al ser sometidas a los procesos (Restrepo, 2014).

### **2.5 Auditoria energética**

La UPME del ministerio de Minas y Energía de Colombia, define a la Auditoría Energética como un proceso sistemático mediante el cual se obtiene un conocimiento suficientemente fiable del consumo energético de la empresa, para detectar los factores que afectan el consumo de energía e identificar, evaluar y ordenar las distintas oportunidades de ahorro de energía en función de su rentabilidad. Las auditorías energéticas son unos mecanismos de revisión y diagnóstico realizados por agentes externos o internos, que permiten a la empresa contar con momentos de verdad sobre el estado de sus consumos de energía, sobre las relaciones entre estos y sus procesos y sobre la forma en que están gestionando el manejo de la energía. Las auditorías son mecanismos para impulsar el conocimiento energético y el desarrollo de la conciencia de las personas y de las organizaciones (Restrepo, 2014).

### **2.6 Sistema de control**

Posteriormente será necesario controlar las variables que están presentes en el medio de reacción como lo son; el vapor de agua sobrecalentado, el ácido sulfúrico con una concentración del 98 % y el caudal de aire suministrado por los compresores.

El ser humano ha venido desarrollando aplicaciones de instrumentación las cuales integran una gran diversidad de sistemas y cuya finalidad es medir magnitudes físicas de un sistema externo, elaborar la información asociada a ellas y presentarla a un operador, ya que las necesidades que crea el mercado de obtener productos terminados con las garantías de calidad exigidas y en la cantidad suficiente para que el precio obtenido sea competitivo, obliga a las industrias a modificar su estructura tecnológica, incluyendo en la transformación subsiguiente la automatización del proceso mediante los instrumentos de medición y control (Mondejar, 2003).

#### **2.6.1 Software Step 7®**

El STEP 7 de Siemens es una herramienta estándar para el simatic S7 y sistemas de automatización que permite al usuario utilizar la capacidad de rendimiento de estos sistemas de forma cómoda y sencilla, contiene funciones convenientes para todas las fases de un proyecto de automatización.

#### **2.6.2 Configuración y parametrización del hardware**

La Herramienta de configuración de hardware se utiliza para la configuración y parametrización del hardware utilizado para un proyecto de automatización. Las siguientes funciones están disponibles:

Configuración de los Bastidores del sistema de automatización se seleccionan de un catálogo electrónico y los módulos seleccionados son asignados a las ranuras necesarias en los bastidores, la configuración de la I distribuido OS se realiza de / en la misma forma que la configuración de los no distribuidos de E / S. módulos de E / S de canal granular también se apoyan.

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

### 2.6.3 Parametrización de la CPU

Propiedades tales como características de reinicio y monitorización en tiempo de ciclo se puede establecer por menú. Multiprocesamiento es compatible, Los datos introducidos se presentan en bloques de datos del sistema en la CPU.

### 2.6.4 Parametrización del módulo

El usuario puede especificar todos los parámetros ajustables de los módulos en las pantallas de entrada. Ajustes a través de interruptores DIP se vuelven innecesarias. La parametrización de los módulos de hardware se produce de forma automática durante la aceleración de la CPU. Por lo tanto, un cambio de un módulo se puede hacer sin otra parametrización.

### 2.6.5 Especificación de la comunicación

Configuración y visualización de enlaces de comunicación, tiempo impulsado para la transmisión de datos cíclica a través de MPI, Selección de los interlocutores, introducción de la fuente de datos y destino de datos en una tabla de Generación de todos los datos del sistema bloques ( SDBs ) para ser cargados. Su transmisión completa a todas las CPUs tiene lugar automáticamente, Parametrización de los bloques de comunicación seleccionados en la programación habitual, idioma (por ejemplo, LADER).

### 2.6.6 Programación

Los siguientes lenguajes de programación probados están disponibles:

Contactos (KOP,AWL (FUP)Lista de instrucciones (IL). El usuario puede crear programas que cumplen con la norma DIN EN 6.1131-3, fácil de usar, LAD de gráficos de píxel y editores FBD apoyan al programador. El funcionamiento es sencillo e intuitivo con la creación de diagramas de escalera y diagramas de bloques de función, se caracteriza por la facilidad de uso familiar de PC, tales como arrastrar y soltar, cortar y pegar, biblioteca de funciones predefinidas complejos (tales como controladores PID) o soluciones estándar específicos del usuario.

El (IL) lenguaje de programación textual con lista de instrucciones hace que sea posible para el usuario crear programas en los que el tiempo de funcionamiento y la ubicación de la memoria están optimizadas y que están "cerca del hardware". Al crear estos programas, opción de entrada en modo incremental y el modo de texto libre, el usuario puede tener ya sea cada entrada inmediatamente verificando de manera "incremental" para la corrección, o crear el programa completo usando solamente los símbolos en un editor de texto y posteriormente siendo traducido por medio de la tabla de símbolo apropiado.

## 2.7 Utilización Matlab R2014b®

Una de las herramientas más poderosa y utilizada en la actualidad para el desarrollo de modelos y la solución de sistemas de ecuaciones complejos es el programa MATLAB y su complemento Simulink del cual se hará una descripción más clara a continuación:

MATLAB es el nombre abreviado de "MATrix LABoratory". MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular puede también trabajar con

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

números escalares – tanto reales como complejos –, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones.

MATLAB tiene también un lenguaje de programación propio. Programa (también llamada release 14), aparecida a mediados de 2004. MATLAB es un gran programa de cálculo técnico y científico. Para ciertas operaciones es muy rápido, cuando puede ejecutar sus funciones en código nativo con los tamaños más adecuados para aprovechar sus capacidades de vectorización. En otras aplicaciones resulta bastante más lento que el código equivalente desarrollado en C/C++ o Fortran. En la versión 6.5, MATLAB incorporó un acelerador JIT (Just In Time), que mejoraba significativamente la velocidad de ejecución de los ficheros \*.m en ciertas circunstancias, por ejemplo cuando no se hacen llamadas a otros ficheros \*.m, no se utilizan estructuras y clases. Aunque limitado en ese momento, cuando era aplicable mejoraba sensiblemente la velocidad, haciendo innecesarias ciertas técnicas utilizadas en versiones anteriores como la vectorización de los algoritmos. En cualquier caso, el lenguaje de programación de MATLAB siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, como ya se ha dicho, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo, MATLAB también dispone de un código básico y de varias librerías especializadas (toolboxes) donde cuenta con complementos como el SIMULINK el cual es un módulo que permite la simulación de sistemas dinámicos a través de una interfaz basada en bloques. (Javier García de Jalon, 2005)

## **2.8 Equipos aire comprimido**

Los compresores son máquinas destinadas a elevar la presión de un cierto volumen de aire, admitido en condiciones atmosféricas hasta una determinada presión exigida en la ejecución de los trabajos realizados por el aire comprimido. (Parker Hannifin Corporation, 2003)

### **2.8.1 Definición y clasificación según los principios de trabajo**

Son dos las clasificaciones fundamentales según los principios de trabajo, en nuestro caso solo abordaremos el de desplazamiento positivo ya que las máquinas existentes en la planta son de este tipo. El compresor de desplazamiento positivo se basa fundamentalmente en la reducción de volumen, el aire es admitido en una cámara aislada del medio exterior, donde su volumen es gradualmente disminuido, produciéndose una compresión, cuando una cierta presión es alcanzada, provoca una apertura de las válvulas de descarga o simplemente el aire es empujado hacia el tubo de descarga durante una continua disminución del volumen en la cámara de compresión

### **2.8.2 Compresor de tornillo**

Este compresor está dotado de una carcasa donde giran dos rotores helicoidales en sentidos opuestos. Uno de los dos rotores posee lóbulos convexos y el otro una depresión cóncava, y son denominados respectivamente, rotor macho y rotor hembra. Los rotores son sincronizados por medio de engranajes; sin embargo existen fabricantes que hacen que un rotor accione a otro por contacto directo. El proceso más común es accionar el rotor macho, obteniéndose una velocidad

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

menor del rotor hembra. Estos rotores giran en una carcasa cuya superficie interna consiste de dos cilindros ligados como un "ocho" (Parker Hannifin Corporation, 2003).

## **2.9 Consumo energético motores de inducción**

Los motores de inducción trifásicos constituyen la principal fuerza motriz de la industria moderna. Estos motores son los principales consumidores de energía eléctrica en el mundo lo cual ha motivado desde hace algunos años en muchos países e industrias a realizar estudios para disminuir el consumo de energía de estos. Parte primordial de estos estudios está en la determinación de su eficiencia y del consumo de energía del motor en su sitio de trabajo.

En la literatura técnica y en la normas se describen diferentes métodos para determinar la eficiencia en los motores eléctricos, algunos de estos métodos muy sofisticados y exactos, pero que a su vez requieren equipos más costosos, y otros más aproximados, baratos y sencillos de implementar. Como el objetivo de nuestro análisis está enfocado a justificar desde el punto de vista económico una nueva inversión o el simple reemplazo de un motor por otro de mayor o menor potencia disponible en la planta, debemos determinar la potencia consumida por el motor y la entregada en el eje, es decir la eficiencia. El grado de exactitud requerido no es muy grande y podemos usar métodos sencillos que nos dan muy buena aproximación de la eficiencia del motor (Miriam Vilaragut, 1996-1998).



|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

## 3 METODOLOGÍA

---

### 3.1 Estudio del proceso

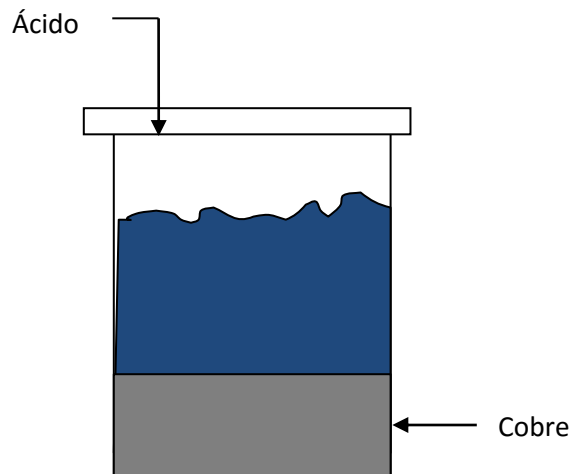
Se toma como volumen de control el espacio que abarca la totalidad del reactor.

Con el objeto de establecer las condiciones iniciales de reacción (Concentración de las especies, temperatura, volumen, tiempo, etc.), se divide el proceso en dos etapas: Etapa 1 – Adición de ácido sulfúrico; Etapa 2 – Reacción. Para ello, es necesario suponer que en la etapa de adición de la cantidad inicial de ácido sulfúrico (Etapa 1), no existe reacción química que genere el producto deseado, es decir, sólo existen cambios físicos dentro del volumen de control.

#### 3.1.1 Proceso químico etapa 1

Comprende desde el inicio hasta el final de la adición de la primera cantidad de ácido sulfúrico sin darse calentamiento a partir de una fuente diferente a la exotermia de disolución del ácido.

Todos los resultados se esperan obtener luego de resolver el sistema de ecuaciones donde se define el modelo de reacción, las ecuaciones se resolverán utilizando el software MATLAB y su complemento SIMULINK, programa que se encuentra disponible en la universidad (ITM campus Robledo) todo esto para determinar cuál es el aporte energético y que ahorro puede representar para el proceso. Para ingresar los datos al programa se tomarán valores históricos del proceso de producción actual, con el fin de determinar valores puntuales de adiciones de ácido y otras variables de influencia en el proceso.



**Figura 1.** Etapa 1 calentamiento (Sólo por adición de ácido sulfúrico)

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

A continuación se muestra la definición de las variables utilizadas en los balances de masa y energía y en las ecuaciones constitutivas para Etapa 1.

| VARIABLE               | DEFINICIÓN   |
|------------------------|--|
| $m_A$                  | Masa de ácido sulfúrico  |
| $T$                    | Tiempo   |
| $\dot{m}_e$            | Flujo másico de la especie a la entrada                          |
| $\dot{m}_s$            | Flujo másico de la especie a la salida                           |
| $\dot{m}_g$            | Flujo másico de la especie que se genera o consume               |
| $\dot{m}_{Ae}$         | Flujo másico de ácido sulfúrico a la entrada                     |
| $C_A$                  | Concentración másica de ácido sulfúrico                          |
| $V$                    | Volumen total del volumen de control                             |
| $E$                    | Energía total  |
| $\dot{E}_e$            | Flujo de energía que ingresa al volumen de control               |
| $\dot{E}_s$            | Flujo de energía que sale del volumen de control                 |
| $\dot{Q}$              | Flujo de calor que entra o sale del volumen de control           |
| $\dot{W}$              | Trabajo por unidad de tiempo                                     |
| $U$                    | Energía interna  |
| $E_K$                  | Energía cinética   |
| $E_p$                  | Energía potencial  |
| $H$                    | Entalpía específica  |
| $P_v$                  | Trabajo de expansión o compresión                                |
| $h_e$                  | Entalpía aportada por los flujos de entrada                      |
| $h_s$                  | Entalpía aportada por los flujos de salida                       |
| $\dot{Q}_T$            | Calor transferido por fuera del volumen de control               |
| $m_T$                  | Masa total contenida en el volumen de control                    |
| $\bar{c}_p$            | Calor específico promedio  |
| $T$                    | Temperatura  |
| $C_{pAe}$              | Calor específico del ácido sulfúrico a la temperatura de entrada |
| $\lambda_{disolución}$ | Calor de disolución del ácido sulfúrico en agua                  |
| $K$                    | Coefficiente de transferencia de calor del material del reactor  |
| $A_T$                  | Área de transferencia de calor (Área superficial)                |
| $x$                    | Espesor del reactor  |
| $T_{ambiente}$         | Temperatura ambiente   |
| $A_A B_A C_A$          | Constantes de calor específico del ácido sulfúrico               |
| $x_i$                  | Fracción molar de la especie $i$                                 |
| $C_{p_i}$              | Calor específico de la especie $i$                               |
| $n_A$                  | Moles de ácido sulfúrico   |
| $n_B$                  | Moles de agua  |

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

|                   |  |
|-------------------|--|
| $n_C$             | Moles de cobre                                     |
| $n_T$             | Moles totales                                      |
| $C_{p_B}$         | Calor específico de agua en el volumen de control  |
| $C_{p_C}$         | Calor específico de cobre en el volumen de control |
| $\rho_A$          | Densidad de ácido sulfúrico                        |
| $F_A$             | Flujo volumétrico de ácido sulfúrico               |
| $A_B \ B_B \ C_B$ | Constantes de calor específico del agua            |
| $A_C \ B_C \ C_C$ | Constantes de calor específico del cobre           |
| $m_B$             | Masa de agua                                       |
| $m_C$             | Masa de cobre                                      |

A continuación se expresa las ecuaciones necesarias para el estudio de la primera etapa.

Balance de masa de ácido sulfúrico:

$$\frac{dm_A}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s - \sum \dot{m}_g$$

Debido a que el ácido sulfúrico no sale del medio y no existe generación del mismo por reacción química, se tiene:

$$\frac{dm_A}{dt} = \dot{m}_{Ae}$$

El ácido sulfúrico ingresa por una sola corriente.

La masa se puede definir en términos de concentración, así:

$$C_A = \frac{m_A}{V} \rightarrow m_A = C_A V$$

$$\frac{d}{dt}(C_A V) = \dot{m}_{Ae}$$

$$C_A \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_A}{dt} = \dot{m}_{Ae}$$

La variación del volumen en las adiciones de ácido en términos porcentuales en la primera unidad de tiempo es:

$$\text{Variación de volumen} = \frac{0.025}{11.8} \times 100\% = 0.21\%$$

Debido a que el flujo de ácido sulfúrico es tan pequeño (aproximadamente 25 L/s = 0.025 m<sup>3</sup>/s) comparado con el volumen inicial del volumen de control (11.8 m<sup>3</sup>), la variación del volumen en la primera unidad de tiempo es pequeña y va disminuyendo a medida que aumenta el tiempo, por lo cual, puede suponerse que no existe variación en el volumen de control. Por tanto:

|   |                                      |         |            |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>ITM<br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|   |                                      | Versión | 03         |
|   |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

$$\frac{dV}{dt} \approx 0$$

$$V \frac{dC_A}{dt} = \dot{m}_{Ae} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Balance de energía:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{E}_e - \sum \dot{E}_s + \sum \dot{E}_g + \sum \dot{Q} - \sum \dot{W}$$

$$E = u + E_K + E_p$$

Como no existen cambios de energía cinética y potencial entonces:

$$E = h + pv$$

Debido a que tanto la adición de ácido sulfúrico y la reacción se llevan a cabo en un recipiente abierto, no existe trabajo de expansión y compresión, por tanto el producto  $pv=0$  y la energía total sólo es aportada o retirada por entalpía, por tanto:

$$E = h$$

$$\frac{dh}{dt} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s - \dot{Q}_T$$

Debido a que no se tienen flujos de salida:

$$\frac{dh}{dt} = \dot{m}_{Ae} h_e - \dot{Q}_T$$

La entalpía específica puede expresarse como:

$$h = m_T \bar{c}_p T$$

$$\frac{d(m_T \bar{c}_p T)}{dt} = \dot{m}_{Ae} h_e - \dot{Q}_T$$

$$\bar{c}_p T \frac{dm_T}{dt} + m_T \frac{d(\bar{c}_p T)}{dt} = \dot{m}_{Ae} h_e - \dot{Q}_T$$

Realizando el mismo análisis anteriormente hecho para los cambios del volumen total de sistema, es posible suponer que:

$$\frac{dm_T}{dt} \approx 0$$

|   |                                      |         |            |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>ITM<br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|   |                                      | Versión | 03         |
|   |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

Por tanto:

$$m_T \frac{d(\bar{c}_p T)}{dt} = \dot{m}_{Ae} h_e - \dot{Q}_T$$

Debido a que la adición de ácido sulfúrico tiene un aporte por el calor de disolución del ácido en agua, la entalpía de flujo está expresada como la suma de la entalpía específica y el calor de disolución.

$$m_T \frac{d(\bar{c}_p T)}{dt} = \dot{m}_{Ae} (C_{pAe} T - \lambda_{\text{disolución}}) - \dot{Q}_T \quad \text{Ecuación (2)}$$

Ecuaciones constitutivas:

$$\dot{Q}_T = \frac{KA_T}{x} (T - T_{\text{ambiente}}) \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$C_{pAe} = A_A + B_A T + C_A T^2 + \dots \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$\bar{c}_p = \sum x_i C_{p_i}$$

$$\bar{c}_p = \frac{n_A}{n_T} C_{pA} + \frac{n_B}{n_T} C_{pB} + \frac{n_C}{n_T} C_{pC}$$

Se supone que la cantidad de ácido sulfúrico es tan pequeña que no aporta significativamente a la capacidad calórica.

$$\bar{c}_p = \frac{n_B}{n_T} C_{pB} + \frac{n_C}{n_T} C_{pC} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$\dot{m}_{Ae} = \frac{m_A}{t} = \frac{\rho_A V_A}{t}$$

$$\dot{m}_{Ae} = \rho_A F_A \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$n_T = n_B + n_C \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$C_{pB} = A_B + B_B T + C_B T^2 \dots \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$C_{pC} = A_C + B_C T + C_C T^2 \dots \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$m_T = m_A + m_B + m_C$$

$$m_T = C_A V + m_B + m_C \quad \text{Ecuación (10)}$$

Tenemos (10) ecuaciones con (10) incógnitas ( $C_A$ ;  $\dot{m}_{Ae}$ ;  $\bar{c}_p$ ;  $C_{pAe}$ ;  $\dot{Q}_T$ ;  $n_T$ ;  $m_T$ ;  $C_{pB}$ ;  $C_{pC}$ ;  $T$ )

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

### 3.1.2 Proceso químico etapa 2

Se considera el inicio de la segunda etapa a la adición constante de vapor saturado como se presenta en la Figura 2. Con el fin de suplir los requerimientos energéticos de la reacción, también se ingresa aire comprimido con el fin de oxidar el cobre presente en el volumen de reacción para que se consuma.

A continuación se muestra la definición de las variables utilizadas en los balances de masa y energía y en las ecuaciones constitutivas para la Etapa 2.

| VARIABLE          | DEFINICIÓN                                      |
|-------------------|---|
| $m_A$             | Masa de ácido sulfúrico                         |
| $\dot{m}_{Ae}$    | Flujo másico de ácido sulfúrico a la entrada    |
| $\dot{m}_{As}$    | Flujo másico de ácido sulfúrico a la salida     |
| $\dot{m}_{Agen}$  | Flujo másico de ácido sulfúrico que se genera   |
| $\dot{m}_{Acons}$ | Flujo másico de ácido sulfúrico que se consume  |
| $t$               | Tiempo  |
| $C_A$             | Concentración másica de ácido sulfúrico         |
| $V$               | Volumen total del volumen de control            |
| $m_B$             | Masa de cobre                                   |
| $\dot{m}_{Be}$    | Flujo másico de cobre a la entrada              |
| $\dot{m}_{Bs}$    | Flujo másico de cobre a la salida               |
| $\dot{m}_{Bgen}$  | Flujo másico de cobre que se genera             |
| $\dot{m}_{Bcons}$ | Flujo másico de cobre que se consume            |
| $C_B$             | Concentración másica de cobre                   |
| $m_C$             | Masa de oxígeno                                 |
| $\dot{m}_{Ce}$    | Flujo másico de oxígeno a la entrada            |
| $\dot{m}_{Cs}$    | Flujo másico de oxígeno a la salida             |
| $\dot{m}_{Cgen}$  | Flujo másico de oxígeno que se genera           |
| $\dot{m}_{Ccons}$ | Flujo másico de oxígeno que se consume          |
| $C_C$             | Concentración másica de oxígeno                 |
| $m_D$             | Masa de sulfato de cobre                        |
| $\dot{m}_{De}$    | Flujo másico de sulfato de cobre a la entrada   |
| $\dot{m}_{Ds}$    | Flujo másico de sulfato de cobre a la salida    |
| $\dot{m}_{Dgen}$  | Flujo másico de sulfato de cobre que se genera  |
| $\dot{m}_{Dcons}$ | Flujo másico de sulfato de cobre que se consume |
| $C_D$             | Concentración másica de sulfato de cobre        |
| $m_E$             | Masa de agua                                    |
| $\dot{m}_{Ee}$    | Flujo másico de agua a la entrada               |
| $\dot{m}_{Es}$    | Flujo másico de agua a la salida                |
| $\dot{m}_{Egen}$  | Flujo másico de agua que se genera              |

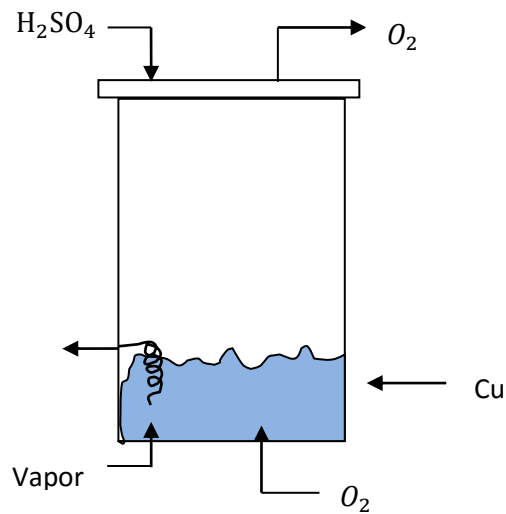
|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

|                   |  |
|-------------------|--|
| $\dot{m}_{Econs}$ | Flujo másico de agua que se consume                              |
| $C_E$             | Concentración másica de agua                                     |
| $E$               | Energía total  |
| $\dot{E}_e$       | Flujo de energía que ingresa al volumen de control               |
| $\dot{E}_s$       | Flujo de energía que sale del volumen de control                 |
| $\dot{Q}$         | Flujo de calor que entra o sale del volumen de control           |
| $\dot{W}$         | Trabajo por unidad de tiempo                                     |
| $u$               | Energía interna  |
| $E_K$             | Energía cinética   |
| $E_p$             | Energía potencial  |
| $h$               | Entalpía específica  |
| $p_v$             | Trabajo de expansión o compresión                                |
| $h_e$             | Entalpía aportada por los flujos de entrada                      |
| $h_s$             | Entalpía aportada por los flujos de salida                       |
| $h_{Ae}$          | Entalpía de ácido sulfúrico a la entrada                         |
| $h_{Be}$          | Entalpía de cobre a la entrada                                   |
| $h_{Ce}$          | Entalpía de oxígeno a la entrada                                 |
| $h_{De}$          | Entalpía de sulfato de cobre a la entrada                        |
| $h_{Ee}$          | Entalpía de agua a la entrada                                    |
| $h_{As}$          | Entalpía de ácido sulfúrico a la salida                          |
| $h_{Bs}$          | Entalpía de cobre a la salida                                    |
| $h_{Cs}$          | Entalpía de oxígeno a la salida                                  |
| $h_{Ds}$          | Entalpía de sulfato de cobre a la salida                         |
| $h_{Es}$          | Entalpía de agua a la salida                                     |
| $\Delta_{dis}$    | Calor de disolución del ácido sulfúrico en agua                  |
| $\Delta H_{Rxn}$  | Calor de reacción  |
| $\dot{m}_{vap}$   | Flujo másico de vapor  |
| $\lambda_{vap}$   | Calor de vaporización del agua                                   |
| $\dot{Q}_T$       | Calor transferido por fuera del volumen de control               |
| $m_T$             | Masa total contenida en el volumen de control                    |
| $\bar{c}_p$       | Calor específico promedio  |
| $T$               | Temperatura  |
| $C_{pAe}$         | Calor específico del ácido sulfúrico a la temperatura de entrada |
| $C_{pCe}$         | Calor específico del oxígeno a la temperatura de entrada         |
| $C_{pCs}$         | Calor específico del oxígeno a la temperatura de salida          |
| $\rho_A$          | Densidad de ácido sulfúrico                                      |
| $F_A$             | Flujo volumétrico de ácido sulfúrico                             |
| $M_A$             | Masa molar de ácido sulfúrico                                    |
| $\nu_{H_2SO_4}$   | Velocidad de reacción con respecto al ácido sulfúrico            |
| $M_B$             | Masa molar de cobre  |
| $\nu_{Cu}$        | Velocidad de reacción con respecto al cobre                      |
| $\rho_C$          | Densidad de oxígeno  |

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

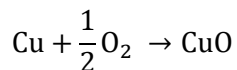
|                     |   |
|---------------------|---|
| $F_C$               | Flujo volumétrico de oxígeno                                    |
| $M_C$               | Masa molar de oxígeno   |
| $\nu_{O_2}$         | Velocidad de reacción con respecto al oxígeno                   |
| $M_D$               | Masa molar de sulfato de cobre                                  |
| $\nu_{CuSO_4}$      | Velocidad de reacción con respecto al sulfato de cobre          |
| $T_{amb}$           | Temperatura ambiente  |
| $A_A B_A C_A$       | Constantes de calor específico del ácido sulfúrico              |
| $A_C B_C C_C$       | Constantes de calor específico del oxígeno                      |
| $K$                 | Coefficiente de transferencia de calor del material del reactor |
| $A_T$               | Área de transferencia de calor (Área superficial)               |
| $X$                 | Espesor del reactor   |
| $\frac{a_g k_l}{H}$ | Constantes de transferencia de oxígeno                          |
| $(CO_2)_g$          | Concentración de oxígeno en estado gaseoso                      |
| $M_E$               | Masa molar de agua  |

Nuevamente será necesario resolver el sistema de ecuaciones para el cual se va a utilizar el software MATLAB-SIMULINK, los balances de masa y energía serán descritos de manera analítica a continuación:



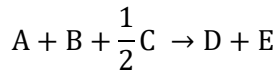
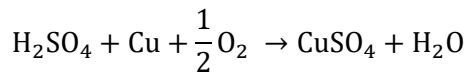
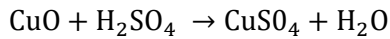
**Figura 2.** Etapa 2 (Reacción química)

A continuación se definen las ecuaciones que describen la etapa 2:





|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |



CuO (B) Cobre

$\frac{1}{2}\text{O}_2$  (C) Oxígeno

$\text{H}_2\text{SO}_4$  (A) Ácido sulfúrico

$\text{CuSO}_4$  (D) Sulfato de cobre

$\text{H}_2\text{O}$  (E) Agua

### Balances de masa

Balance de masa ácido sulfúrico:

$$\frac{dm_A}{dt} = \sum \dot{m}_{Ae} - \sum \dot{m}_{As} - \sum \dot{m}_{A\text{gen}} - \sum \dot{m}_{A\text{cons}}$$

El ácido sulfúrico no sale del sistema ni se genera en una reacción química, por tanto:

$$\frac{dm_A}{dt} = \dot{m}_{Ae} - \dot{m}_{A\text{cons}}$$

La masa se puede expresar en términos de la concentración másica de la siguiente forma:

$$C_A = \frac{m_A}{V} \rightarrow m_A = C_A V$$

$$\frac{d}{dt}(C_A V) = \dot{m}_{Ae} - \dot{m}_{A\text{cons}}$$

Debido a las suposiciones realizadas en la Etapa 1 sobre la variación del volumen con respecto al tiempo en el volumen de control, se tiene:

$$V \frac{dC_A}{dt} = \dot{m}_{Ae} - \dot{m}_{A\text{cons}} \quad \text{Ecuación (1) Balance de masa cobre:}$$

$$\frac{dm_B}{dt} = \sum \dot{m}_{Be} - \sum \dot{m}_{Bs} + \sum \dot{m}_{B\text{gen}} - \sum \dot{m}_{B\text{cons}}$$

El cobre es alimentado desde el inicio de la etapa 1, no existe un flujo constante del mismo. Adicionalmente no se retira cobre del sistema ni se genera en alguna reacción química, por tanto el cambio de la masa de cobre está en función de la masa consumida en la reacción química:

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

$$\frac{dm_B}{dt} = -\dot{m}_{Bcons}$$

$$V \frac{dC_B}{dt} = -\dot{m}_{Bcons} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Balance de masa oxígeno:

$$\frac{dm_C}{dt} = \sum \dot{m}_{Ce} - \sum \dot{m}_{Cs} + \sum \dot{m}_{Cgen} - \sum \dot{m}_{Ccons}$$

El oxígeno entra y sale del sistema en el flujo de aire, no existe acumulación, debido a que la capacidad de retención de oxígeno en estado gaseoso en el medio de reacción es insignificante a temperaturas superiores a la temperatura ambiente, por tanto:

$$V \frac{dC_C}{dt} = 0 = \dot{m}_{C\text{ entra}} - \dot{m}_{C\text{ sale}} - \dot{m}_{C\text{ cons}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Balance de masa de sulfato de cobre:

$$\frac{dm_D}{dt} = \sum \dot{m}_{De} - \sum \dot{m}_{Ds} + \sum \dot{m}_{Dgen} - \sum \dot{m}_{Dcons}$$

$$V \frac{dC_D}{dt} = \dot{m}_{Dgen} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Balance de masa agua:

$$\frac{dm_E}{dt} = \sum \dot{m}_{Ee} - \sum \dot{m}_{Es} - \sum \dot{m}_{Egen} - \sum \dot{m}_{Econs}$$

$$V \frac{dC_E}{dt} = \dot{m}_{Egen} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Balance de energía:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{E}_e - \sum \dot{E}_s + \sum \dot{E}_g + \sum \dot{Q} - \sum \dot{W}$$

$$E = u + E_K + E_p$$

Se desprecian los cambios de energía cinética y potencial ya que la agitación no genera trabajo en el volumen de control.

$$E = h + pv$$

Como no hay expansión ni compresión  $pv$  es igual a cero.

$$\frac{dh}{dt} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s + \sum \dot{E}_g + \sum \dot{Q}$$

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

$$\frac{dh}{dt} = \dot{m}_{Ae}h_{Ae} + \dot{m}_{Be}h_{Be} + \dot{m}_{Ce}h_{Ce} + \dot{m}_{De}h_{De} + \dot{m}_{Ee}h_{Ee} - (\dot{m}_{As}h_{As} + \dot{m}_{Bs}h_{Bs} + \dot{m}_{Cs}h_{Cs} + \dot{m}_{Ds}h_{Ds} + \dot{m}_{Es}h_{Es}) - \Delta H_{RXN} - Q_T + \dot{m}_{vap}\lambda_{vap}$$

$$\frac{dh}{dt} = \dot{m}_{Ae}h_{Ae} + \dot{m}_{ee}h_{ee} - \dot{m}_{es}h_{es} - \Delta H_{RXN} - Q_T + \dot{m}_{vap}\lambda_{vap}$$

$$h = m_T \bar{C}_p T$$

Debido a las suposiciones con respecto a la masa y el calor específico realizadas en la etapa 1, se tiene:

$$m_T \bar{C}_p \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{Ae}(C_{pAe}T - \lambda_{dis}) + \dot{m}_{Ce}C_{pCe} - \dot{m}_{Cs}C_{pCs} - \Delta H_{RXN} - Q_T + \dot{m}_{vap}\lambda_{vap} \quad \text{Ecuación (5')}$$

Ecuaciones constitutivas:

$$\dot{m}_{Ae} = \rho_A F_A \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\dot{m}_{Acons} = M_A V_{H_2SO_4} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$\dot{m}_{Bcons} = M_B V_{Cu} = M_B V_{H_2SO_4} \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$\dot{m}_{Ce} = \rho_C F_C \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$\dot{m}_{Ccons} = M_C V_{O_2} = M_C \frac{V_{H_2SO_4}}{2} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$\dot{m}_{Dgen} = M_D V_{CuSO_4} = -M_D V_{H_2SO_4} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$C_{pAe} = A_A + B_A T_{amb} + C_A T_{amb}^2 + \dots + \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$C_{pCe} = A_C + B_C T_e + C_C T_e^2 + \dots + \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$C_{pCs} = A_C + B_C T + C_C T^2 + \dots + \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$\dot{Q}_T = \frac{KA_T}{X} (T - T_{amb}) \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$V_{H_2SO_4} = -2 \left( \frac{a_g k_1}{H} \right) (CO_2)_g \quad \text{Ecuación (17)}$$

Variables dependientes:

$$\frac{a_g k_1}{H} = (-0.36Fe^2 + 1.098Fe - 0.1728) \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$m_T = m_A + m_B + m_C + m_D + m_E$$

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

$$m_T = V(C_A + C_B + C_C + C_D + C_E) \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$\dot{m}_{E \text{ gen}} = -M_E * \nu_{H_2SO_4} \quad \text{Ecuación (20)}$$

### 3.2 Análisis equipos aire comprimido

Para determinar qué tipo de compresores se están utilizando será necesario consultar en el manual del fabricante donde se especifique la potencia eléctrica requerida, la presión del aire suministrado y el caudal entregado según la altura sobre el nivel del mar donde sea instalado.

### 3.3 Análisis eficiencia térmica caldera

En la empresa Productos Químicos Panamericanos (PQP) actualmente se cuenta con una caldera horizontal de 200 BHP para consumo de carbón la cual es la encargada de suministrar el vapor a los procesos que lo requieren, a continuación se dan algunas definiciones claves para el desarrollo del estudio:

**Caldera:** dispositivo electromecánico utilizado para generar vapor de agua cambiando de fase líquida a gaseosa un fluido (Agua). Por medio de un aporte de energía térmica externa que puede ser obtenida de gran variedad de combustibles tanto sólidos, líquidos y gaseosos.

**Caldera piro-tubular:** los gases de combustión circulan a través de los tubos que se encuentran sumergidos en el agua, (Bajas capacidades y consumo de vapor).

**Combustión:** es el proceso que se realiza en la cámara de combustión del generador de vapor el cual transforma la energía química del combustible en energía térmica a través de una energía de activación.

**Calor sensible (Q sensible):** es la energía térmica que se le transfiere a un cuerpo sin que se vea afectada su estructura molecular y por lo tanto su estado.

**Calor latente (Q latente):** Es la mínima cantidad de energía que necesita en nuestro caso el agua para cambiar de estado líquido a gaseoso sin aumentar la temperatura.

**Entalpía:** es una magnitud termodinámica que expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

**Proceso isoentálpico:** se da con los valores de entalpía constantes.

Formulas:

$$Q_{\text{sensible}} = C_p H_2O_{\text{promedio}} (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$Q_{\text{sensible}} = h_f \text{ a } 169,1 \text{ }^\circ\text{C} - h_f \text{ a } 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Considerando que no hay fugas en el sistema obtenemos que:

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

$$\dot{m}_{\text{agua\_entrada}} = \dot{m}_{\text{vapor\_generado}}$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = Q_{\text{total}} * \dot{m}_{\text{vapor}} \quad \text{Calor necesario para evaporar el agua}$$

$$\dot{Q}_{\text{Combustible}} = \text{PCI} * \dot{m}_{\text{Combustible}}$$

$$n_{\text{termica-caldera}} = \frac{\dot{Q}_{\text{vapor}}}{\dot{Q}_{\text{combustible}}} \times 100$$

Para establecer los balances de masa de agua y combustible de la caldera será necesario tomar medidas en campo de cuál es el consumo actual.

Procedimiento para hallar la calidad del vapor y por consiguiente la eficiencia térmica de la caldera;

Para poder hallar la eficiencia térmica de la caldera es necesario conocer el valor de la entalpia del vapor que se genera, ya que no se cuenta en la planta con equipos para medir la calidad del vapor se procedió a medir datos de temperatura a la salida de la caldera luego de hacer pasar el vapor por una válvula, la cual cambia sus propiedades de presión y temperatura. Para realizar este tipo de medidas fue necesario cursar materias como termodinámica y transferencia de calor en época de estudios dentro de la universidad (ITM), el método básicamente se basa en un calorímetro de estrangulamiento el cual se fundamenta en la expansión adiabática del vapor sin realizar trabajo externo por lo que la energía del vapor permanece constante, lo que implica que la entalpia a la entrada de la válvula de estrangulamiento y a la salida son las mismas lo cual llama la literatura procesos isoentálpicos. Para realizar dicho experimento la tubería y la válvula donde se estrangulara el vapor debe estar aislada térmicamente de la mejor manera para evitar pérdidas por convección. A continuación una breve descripción del funcionamiento del calorímetro.

### **Calorímetro de estrangulamiento**

Cuando el vapor se expande adiabáticamente sin hacer trabajo externo, como por un orificio por ejemplo, las entalpias a alta presión y baja presión son las mismas (si no existe un cambio neto de velocidad del vapor). Esta expansión se denomina estrangulamiento. El proceso de estrangulamiento se define por  $h_1 = h_2$  y se utiliza comúnmente en la práctica para determinar la calidad del vapor (Nevarez, 2014)

Para tomar los datos de temperatura se utilizaron cuatro equipos diferentes:

1. Termocupla.
2. Controlador de temperatura (Max termo)
3. Termómetro de alcohol.
4. Termómetro de mercurio.

|   |                                      |         |            |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>ITM<br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|   |                                      | Versión | 03         |
|   |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

### 3.4 Caracterización de las variables

#### 3.4.1 Cantidad de oxígeno necesario para la reacción

Para determinar la cantidad de oxígeno necesario partiremos del análisis estequiométrico de la reacción y por medio del software MATLAB-SIMULINK se solucionara el sistema de ecuaciones, obteniendo datos aproximados del oxígeno que reaccionara en el medio y del que será liberado al ambiente sin realizar ningún tipo de aporte al proceso. El balance de masa se define a continuación:

Balance de masa oxígeno:

$$\frac{dm_C}{dt} = \sum \dot{m}_{Cent} - \sum \dot{m}_{Csal} + \sum \dot{m}_{Cgen} - \sum \dot{m}_{Ccons}$$

El oxígeno que se genera es cero por lo tanto tenemos que;

$$V \frac{dC_C}{dt} = \dot{m}_{Centrada} - \dot{m}_{Csale} - \dot{m}_{Ccons}$$

#### 3.4.2 Tiempos necesarios para la obtención del producto

Para estimar los tiempos necesarios para la obtención del producto final se ingresaran nuevamente las ecuaciones al software MATLAB-SIMULINK y por medio de iteraciones podremos determinar cuál es el tiempo necesario para que se genere la cantidad de sulfato de cobre especificada.

#### 3.4.3 Cantidad de energía liberada en la reacción

Para determinar la cantidad de energía liberada en la reacción partiremos de la estequiometria del proceso y los balances de masa de ácido sulfúrico, ya que este representa un aporte energético muy significativo para el volumen de reacción. Los datos de calor de reacción se calculan acorde a los calores de formación con sus respectivos coeficientes estequiométricos, y el calor de disolución del ácido sulfúrico depende tanto de la masa de ácido adicionada como de la masa de agua presente en el sistema.

#### 3.4.4 Flujo de calor necesario para llevar a cabo la reacción

El flujo de calor necesario para la reacción se determinara solucionando el sistema de ecuaciones, donde se ingresaran los balances de energía y balances de masa de las variables que representan un aporte energético para el proceso, en este caso es importante tener en cuenta el aporte energético de disolución del ácido sulfúrico y el flujo másico de vapor.

#### 3.4.5 Calculo consumo de vapor requerido

Para determinar el consumo de vapor requerido como fuente de energía en el proceso de reacción, se parte de la cantidad actual de vapor utilizada en el proceso y se realizaran variaciones alrededor de este punto, manteniendo constante el suministro de ácido sulfúrico y de oxígeno. De

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

tal manera que se permita visualizar en el modelo resuelto en Matlab-Simulink de qué forma impacta el cambio en el suministro de vapor sobre la concentración del producto final a lo largo del tiempo. Seleccionando aquel flujo de vapor que permita la obtención de la concentración requerida de sulfato de cobre en el tiempo de reacción establecido, siendo este flujo de vapor presumiblemente menor que el utilizado en la actualidad.

### **3.4.6 Rangos de presión y temperatura de trabajo necesarios para el proceso**

Los rangos de temperatura se obtendrán luego de modelar el proceso, donde serán arrojados datos de temperaturas alcanzadas en la primera etapa por adición de ácido sulfúrico, y en la segunda etapa en la reacción química como tal. El aumento de temperatura es proporcional al aporte de energía, por ende se deben controlar las variables para poder establecer los límites, las variables a controlar serán el flujo másico de vapor y el flujo másico de ácido sulfúrico.

### **3.5 Determinación de los equipos necesarios para el suministro de aire comprimido.**

Para determinar las características técnicas necesarias de los sopladores o compresores para garantizar el cumplimiento de la demanda requerida, es necesario establecer el consumo real actual y el exceso de oxígeno en el medio, para elegir qué tipo de soplador y con qué características de caudal y presión debe cumplir para que oxide la mezcla. Nuevamente será necesario realizar iteraciones en el programa hasta obtener un flujo de aire positivo a la salida del reactor que sea lo más mínimo posible, para poder garantizar que el flujo de oxígeno aportado por el equipo de compresión es suficiente para la reacción sin mayores desperdicios.

### **3.6 Cuantificación del consumo de energía**

La cuantificación de la energía se hará de acuerdo a la identificación de los consumos de energía eléctrica y energía térmica de los equipos que están involucrados en el proceso.

#### **Consumo de energía de los dispositivos involucrados en el proceso**

Para determinar los consumos de energía eléctrica y térmica actuales de los dispositivos involucrados en el proceso, será necesario consultar en los manuales de los fabricantes donde se establece la potencia real instalada y partiendo del porcentaje de carga a la que están sometidos los equipos se establecerán los consumos. Hablando del consumo de energía eléctrica se pueden encontrar numerosos métodos para la determinación de la eficiencia y la potencia entregada o consumida por un motor trifásico de inducción, todos estos métodos combinan acciones que se realizan sobre el motor y caracterizan diferentes parámetros.

#### **Métodos**

**Lectura del dato de placa:** con los datos de placa se determina o lee la eficiencia y con la lectura de la potencia de entrada se determina la potencia de salida. Es un método no invasivo y no requiere sacar el motor de servicio, pero parte de suponer que la eficiencia es constante para cualquier estado de carga. En motores medios y grandes el error cometido no es muy considerable debido a que estos poseen curvas de eficiencia muy planas, en motores pequeños (< 5 HP) la

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

eficiencia baja considerablemente con la carga y el error cometido puede ser grande si este se encuentra con poca carga.

**Medición del consumo mediante un analizador de redes:** Es el método más exacto para determinar la potencia de entrada al motor. Se puede leer la corriente y la potencia reactiva para luego determinar el factor de potencia. Es un método invasivo y el instrumento de medida es muy costoso.

**Medición directa de par o momento:** Es un equipo que mide par y ligándolo a la velocidad del motor nos da la potencia de salida con gran exactitud. El método es invasivo y requiere dejar el motor fuera de servicio para instalar el medidor, fuera de lo anterior el equipo es costoso.

**Medición de velocidad con un tacómetro óptico:** En este caso se utiliza la medición de velocidad y el cálculo del deslizamiento para calcular la potencia de salida, ya que el par o momento electromagnético es proporcional al deslizamiento. Es un método poco invasivo, pero requiere del instrumento de medida que es bastante costoso (Miriam Vilaragut, 1996-1998).

Luego de revisar diferente material bibliográfico acerca de métodos para la evaluación energética de motores de inducción, se optó por realizar los cálculos con los datos de placa asumiendo el error y partiendo de que el resultado es una aproximación.

### 3.7 Energía térmica ingresada al proceso

La energía térmica ingresada actualmente se obtendrá a partir del análisis de la eficiencia térmica de la caldera lo cual requerirá realizar balances de masa y energía.

### 3.8 Energía ingresada al proceso actualmente

La energía ingresada al proceso se obtendrá de la sumatoria de todas las energías suministradas a los equipos utilizados actualmente en el proceso.

### 3.9 Costos energéticos y tiempos de producción

Para evaluar los costos energéticos actuales se utilizará la información del consumo de energía de los dispositivos involucrados en el proceso, para los tiempos de producción requeridos actualmente nos dirigiremos a los históricos del proceso.

### 3.10 Eficiencia del proceso actual

Es necesario comparar el estado actual del proceso con la necesidad ideal de consumo energético, la cual obtendremos tras la modelación del proceso en MATLAB-SIMULINK, donde se establecen los tiempos necesarios para la obtención del sulfato de cobre.


$$n_{\text{Proceso}} = \frac{(\text{Energía util proceso})}{(\text{Energía suministrada proceso})} \quad \text{Eficiencia proceso}$$



|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

### **3.11 Modelamiento de la solución al problema**

El modelamiento de la solución del problema se obtendrá a partir de los datos arrojados por el software donde se ingresó el sistema de ecuaciones que define el proceso, dando diferentes valores energéticos los cuales tienen una afectación directa en la reacción química, para obtener datos que arrojen estados del proceso actualmente y de la representación que se haría idealmente.

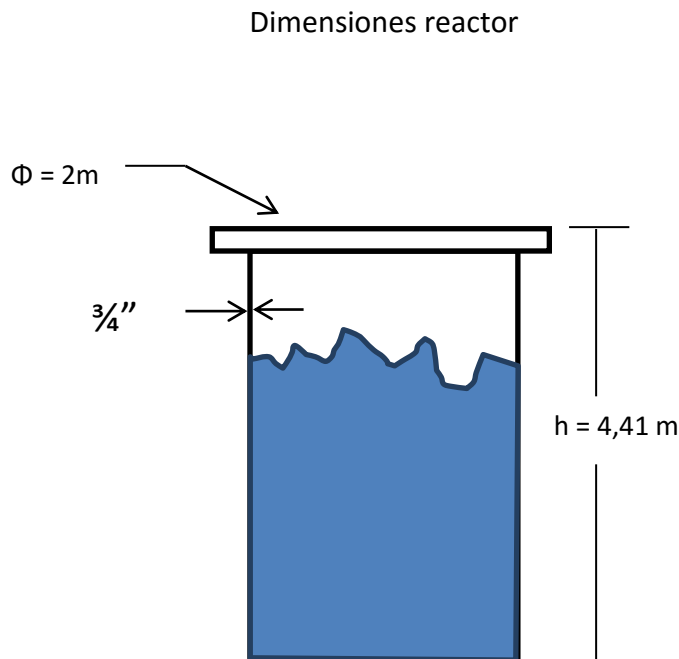
|   |                                      |         |            |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|   |                                      | Versión | 03         |
|   |                                      | Fecha   | 2015-01-27 |

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados estudio del proceso

#### 4.1.1 Proceso químico Etapa 1

El ácido sulfúrico al entrar en contacto con el agua en el volumen de reacción ver **Figura 3**. Libera energía en forma de calor la cual no es aprovechada actualmente. Con la solución del primer sistema de ecuaciones donde se ingresaron valores constantes de flujo másico de ácido en primera instancia los cuales se obtuvieron de los históricos de varios años de reacción en la compañía **Productos Químicos Panamericanos planta Girardota**, se pudo determinar cuál era la concentración de ácido al inicio y la temperatura final de la primera etapa para tomarlo como punto de partida de la segunda etapa, los dos valores tanto concentración de ácido en el medio como la temperatura final son puntuales y servirán para alimentar las condiciones iniciales del segundo sistema de ecuaciones.



**Figura 3.** Volumen de reacción

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

Volumen reactor

$$V_{\text{Cilindro}} = \frac{\pi}{4} \phi^2 * h$$

$$V_{\text{Cilindro}} = \left(\frac{\pi}{4} 2\text{m}^2\right) (4,41\text{m})$$

$$V_{\text{Cilindro}} = 13,8544 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Reacción}} = 13,8544 \text{ m}^3 * 0,8 = 11,0835 \text{ m}^3$$

Área de transferencia ( $\text{m}^2$ )

$$A_{\text{Transferencia}} = \pi \phi h$$

$$A_{\text{Transferencia}} = (\pi)(2\text{m})(4,41\text{m}) = 27.708 \text{ m}^2$$

X = 3/4" → Espesor del reactor

$$\lambda_{\text{disolución}} = -18,08 \frac{\text{cal} * \text{Kg agua}}{\text{mol ácido}}$$

Página 2203 Perry's

Agua: (J / Kmol \* K)

A:  $2.7637 \times 10^5$                                   Tablas 2-196 Perry's

B:  $- 2.0901 \times 10^3$

C: 8.1250

Cobre: (Cal / mol\*K)

A: 5.44    Tablas 2-194 Perry's

B: 0.001462

Ácido sulfúrico (Cal/g\* °c)

A: 0.3404    Tablas 2-217 Perry's

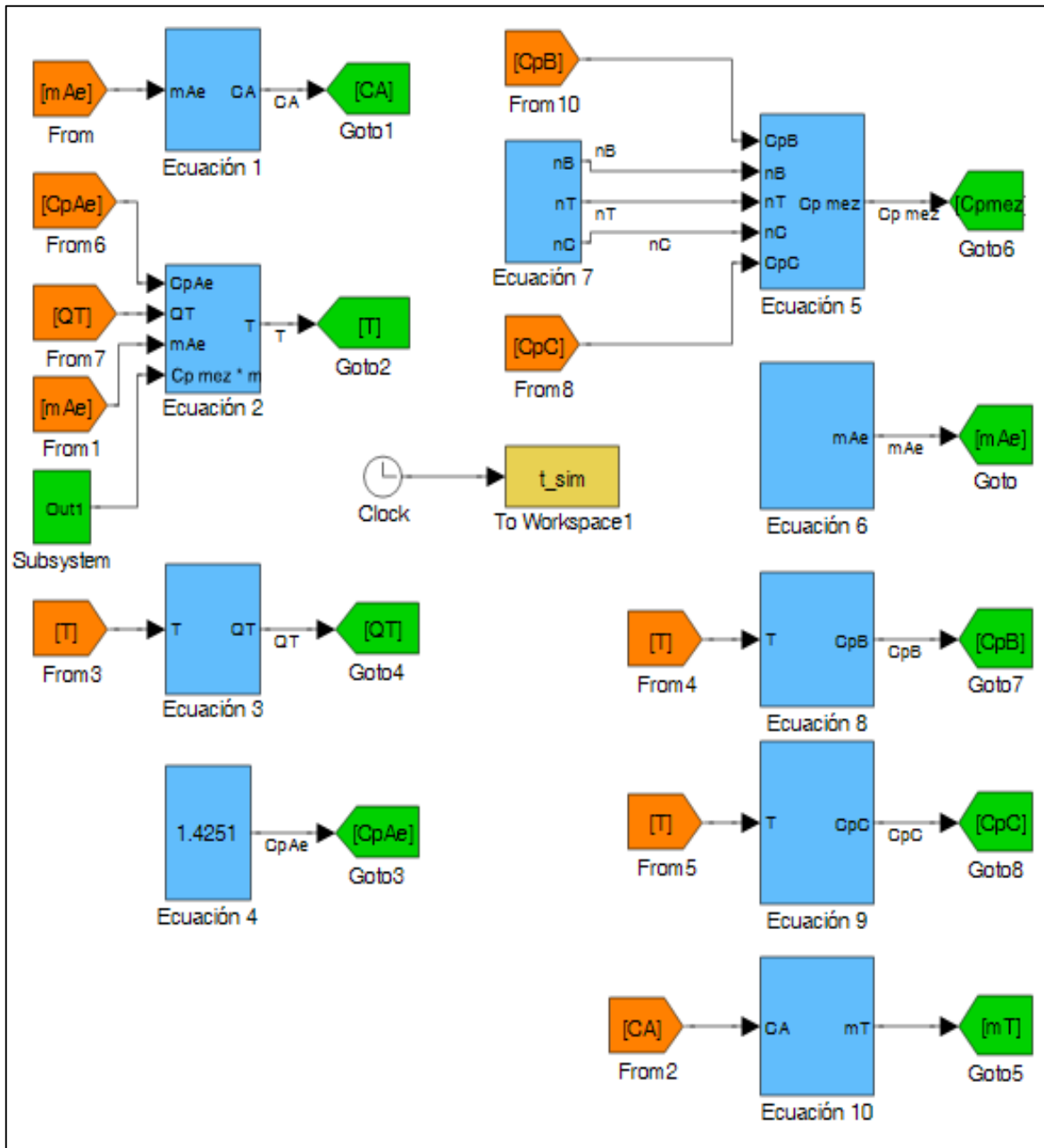
(GREEN, 1999)

$K_{\text{Fibra de vidrio}} = 0,03 - 0,07 \left(\frac{w}{k * m}\right)$                       Tablas propiedades de los materiales

Flujo volumétrico: Actualmente se cuenta con una Moto-bomba la cual tiene capacidad de hasta 70 L/min.

Para modelar el sistema fue necesario utilizar el programa MATLAB y su complemento SIMULINK donde se ingresaron todas las ecuaciones con sus variables dependientes e independientes, las

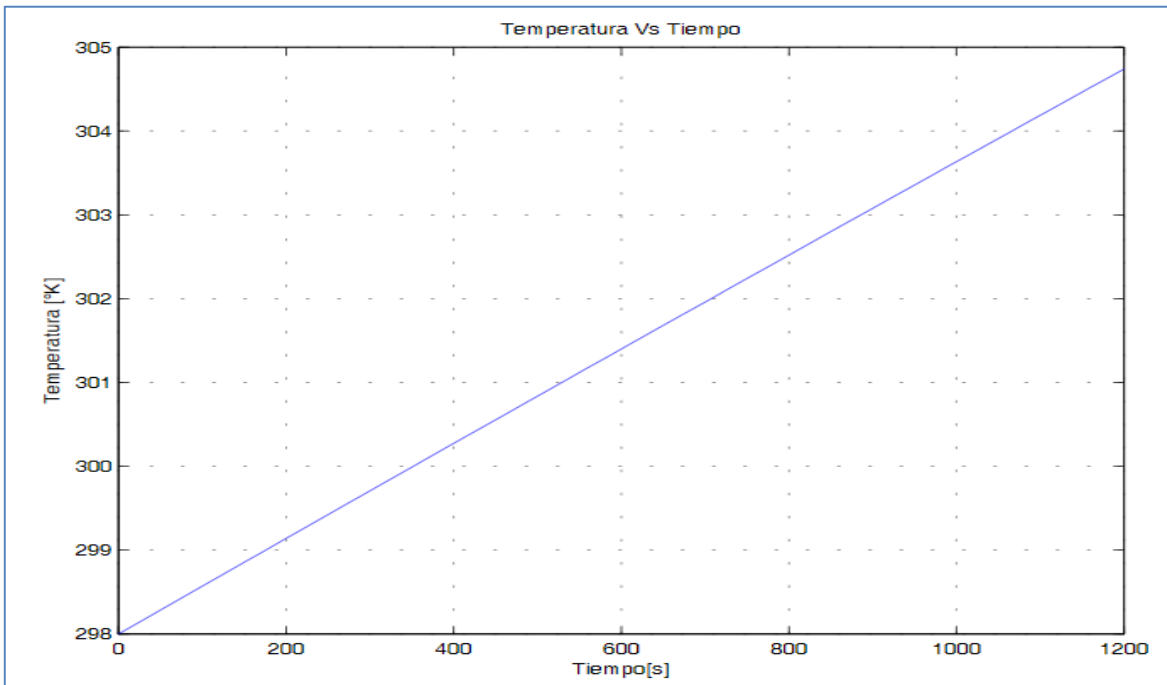
cuales se obtuvieron de la literatura. Sé simulo en tiempos estimados de reacción según el funcionamiento actual del proceso. Para la programación no es necesario ser un experto la idea de ingresar ecuaciones formadas por sumas, restas, multiplicaciones e integrales al software es poder encontrar solución como en cualquier otro programa por medio de iteraciones, donde se busca repetir un proceso hasta encontrar la solución deseada ya que se cuenta con un sistema donde el número de ecuaciones es igual al número de incógnitas. Para ilustrar mejor el modelo se presenta el diagrama compuesto por subsistemas correspondiente a la primera etapa, (ver figura 4).



**Figura 4.** Diagrama de flujo etapa 1

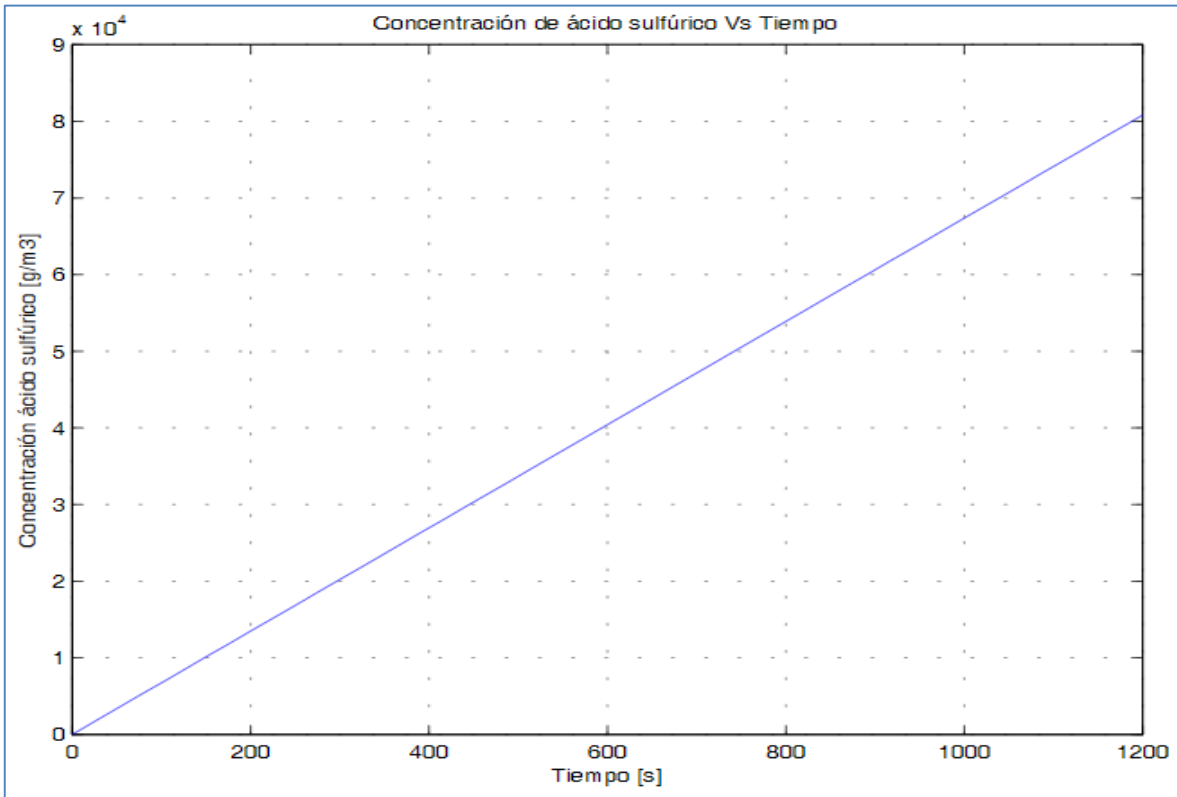
Luego de obtener la solución del sistema de ecuaciones en un tiempo dado de 1200s se presentan los siguientes gráficos:

La Figura 5 representa la temperatura alcanzada en un tiempo de 1200s solo por adición de ácido sulfúrico al volumen de reacción, en el cual se depositó una masa aproximada de 895.44 kg. La cantidad de ácido que se adiciono fue determinada de acuerdo a los históricos de fabricación de sulfato de cobre en la planta, arrojando como temperatura final de la primera etapa 305 K (32°C) Valor que nos servirá posteriormente para ingresarlo como temperatura inicial de la etapa 2.



**Figura 5.** Grafica Temperatura Vs Tiempo

La concentración de ácido sulfúrico en el medio de reacción luego de depositar 895.44 Kg es de 80810 g/m<sup>3</sup> o 80.81 Kg/m<sup>3</sup> esta concentración se obtuvo en un tiempo de simulación de 1200s donde se estableció el flujo másico de la bomba de 0.39 L/s. Los datos obtenidos serán necesarios para iniciar la segunda etapa (ver figura 6).



**Figura 6.** Concentración de ácido sulfúrico Vs Tiempo

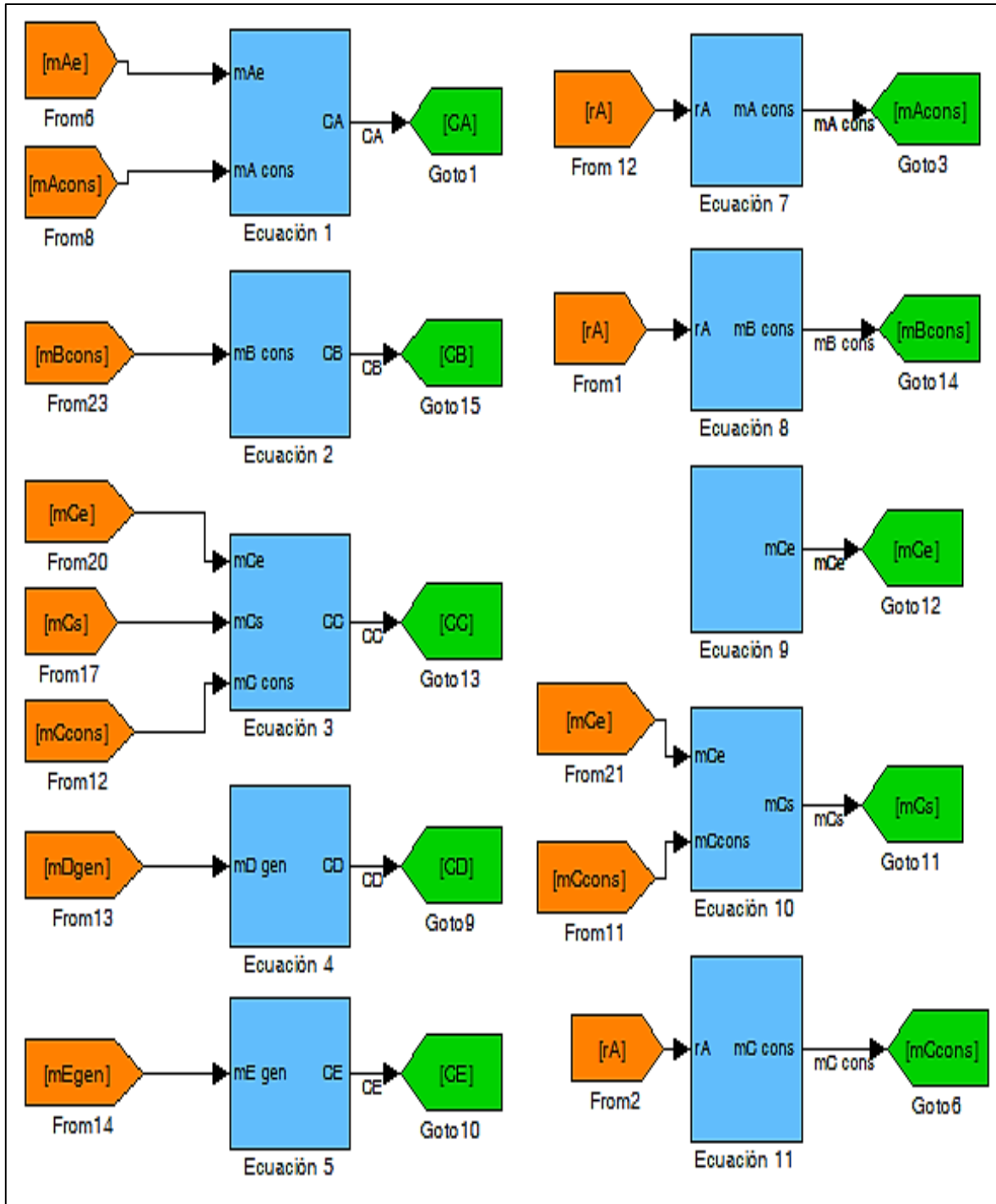
### 2.1.1 Proceso químico Etapa 2

Nuevamente el sistema se modeló utilizando el software MATLAB-SIMULINK donde se ingresó el sistema de ecuaciones descrito en la metodología para la segunda etapa. Los valores de concentración de ácido sulfúrico y temperatura inicial de la reacción se tomaron de los datos obtenidos de la modelación de la primera etapa (ver figura 6).

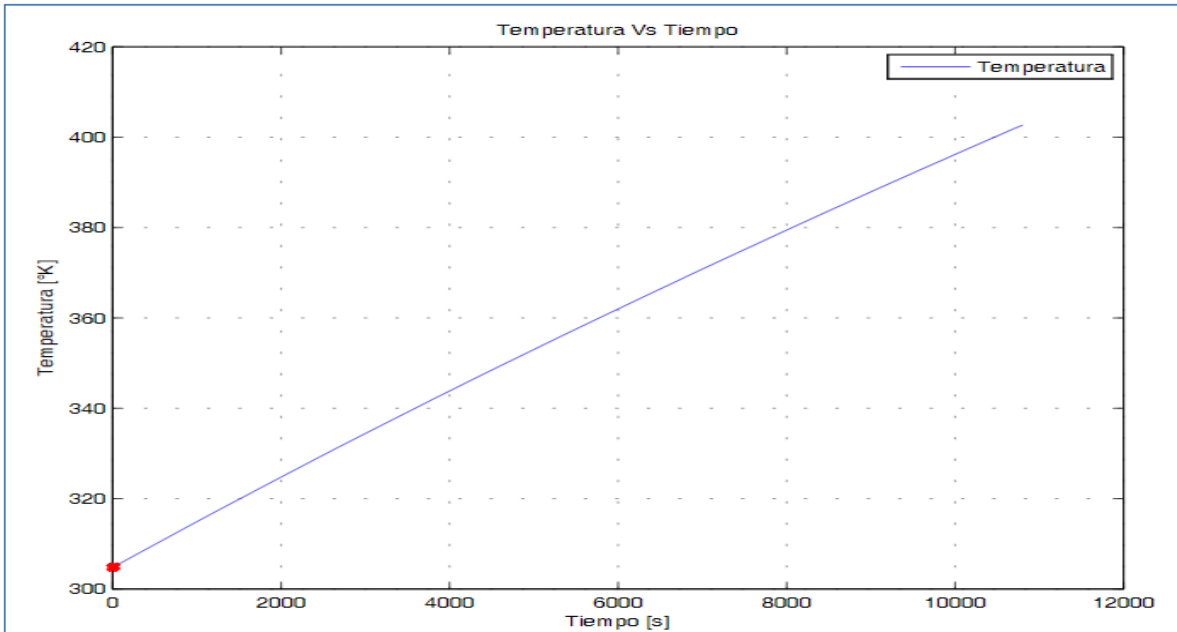
Luego de iniciar la segunda etapa donde se ingresan 160 g/s de vapor saturado en un tiempo dado de 5000s se obtiene que la temperatura en el volumen de reacción está en un valor aproximado de 336.3 K (66.15 °C) sin adicionar ácido sulfúrico al medio de reacción. Los datos de consumo de vapor se determinaron por medio del balance de masa en la caldera de acuerdo al consumo de agua (ver figura 8).

Observando el gráfico se puede diferir la primera ineficiencia que se presenta en la operación del proceso actual ya que los operarios por muchos años han venido adicionando ácido sulfúrico en intervalos de tiempo de 5 hasta 6,5 horas (Datos tomados de los históricos de fabricación del producto), según la modelación a los 40 minutos aproximadamente la concentración de ácido sulfúrico en el medio es cero, lo que implica que el proceso no está generando sulfato de cobre porque no cuenta con ácido para reaccionar, también conlleva al consumo injustificado de energía

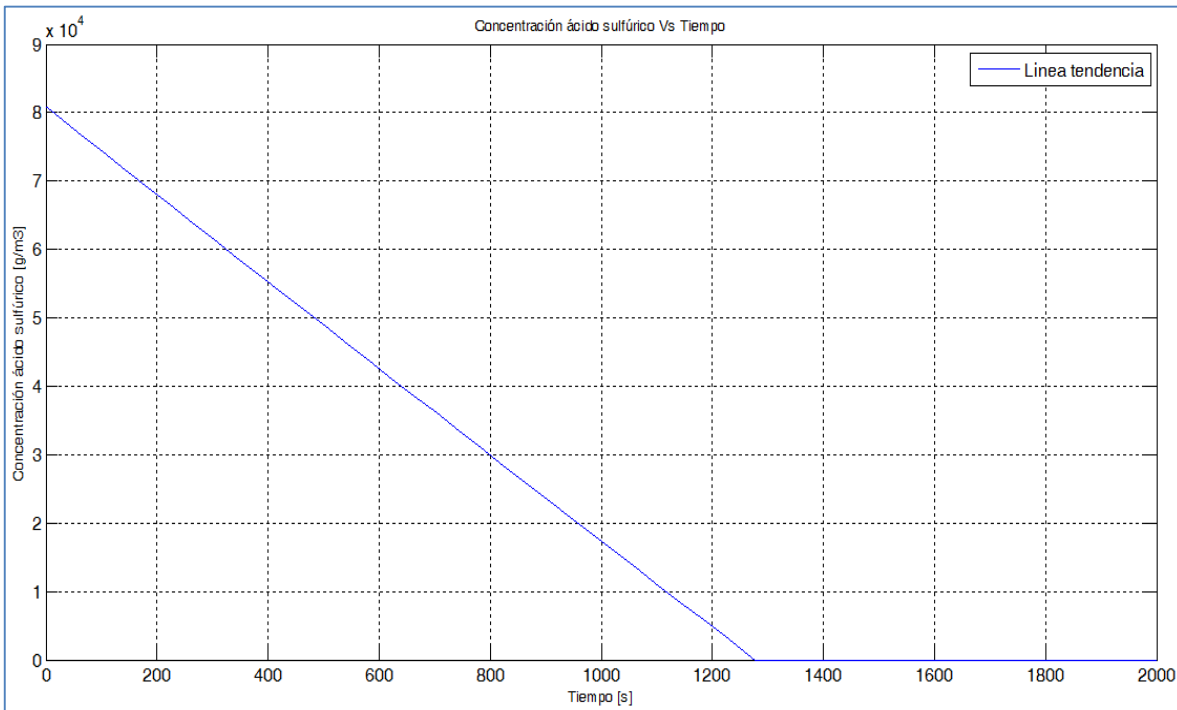
manifestada en calor y aire comprimido que se ingresa al medio sin control alguno. Por tal motivo es necesario el diseño del control para la adición de ácido de manera continua o en intervalos más cortos, indicando cual es la concentración de ácido en el medio y que de esta dependa el ingreso de vapor y de aire comprimido, (ver figura 9).



**Figura 7.** Diagrama de flujo programación MATLAB-SIMULINK etapa 2.



**Figura 8.** Temperatura Vs Tiempo

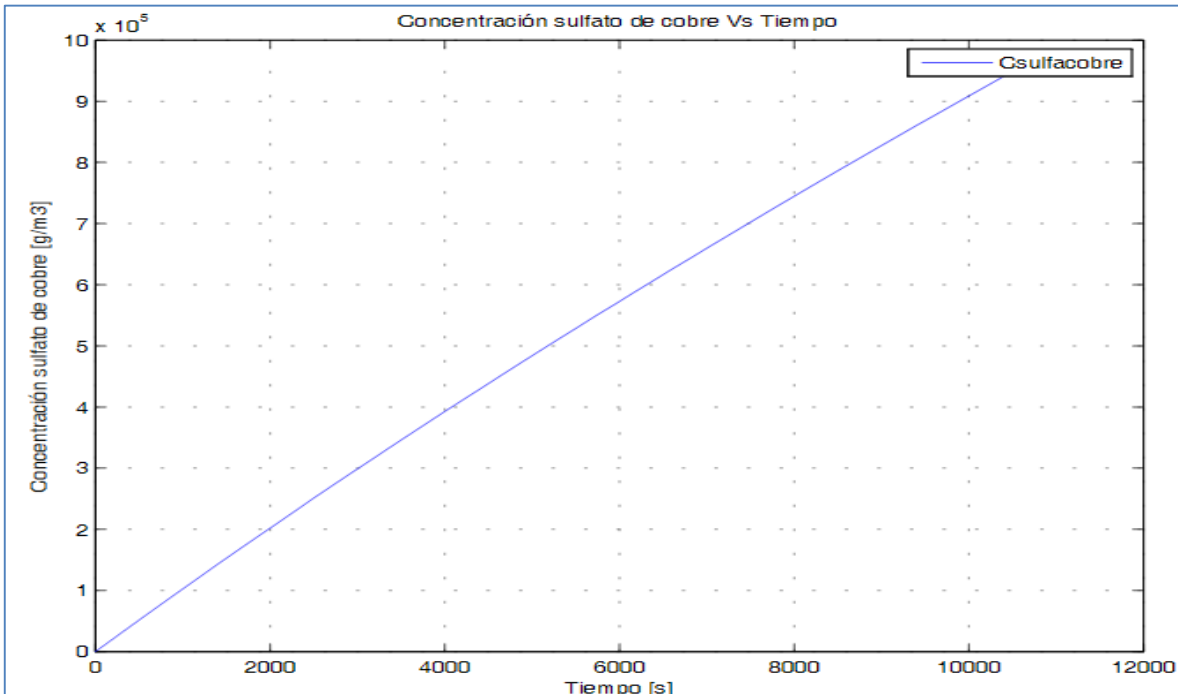


**Figura 9.** Concentración de ácido sulfúrico Vs Tiempo

De la figura 10 se infiere que la producción de sulfato de cobre se ve afectada directamente por la concentración de ácido sulfúrico en el medio de reacción, no importa la cantidad de tiempo que se



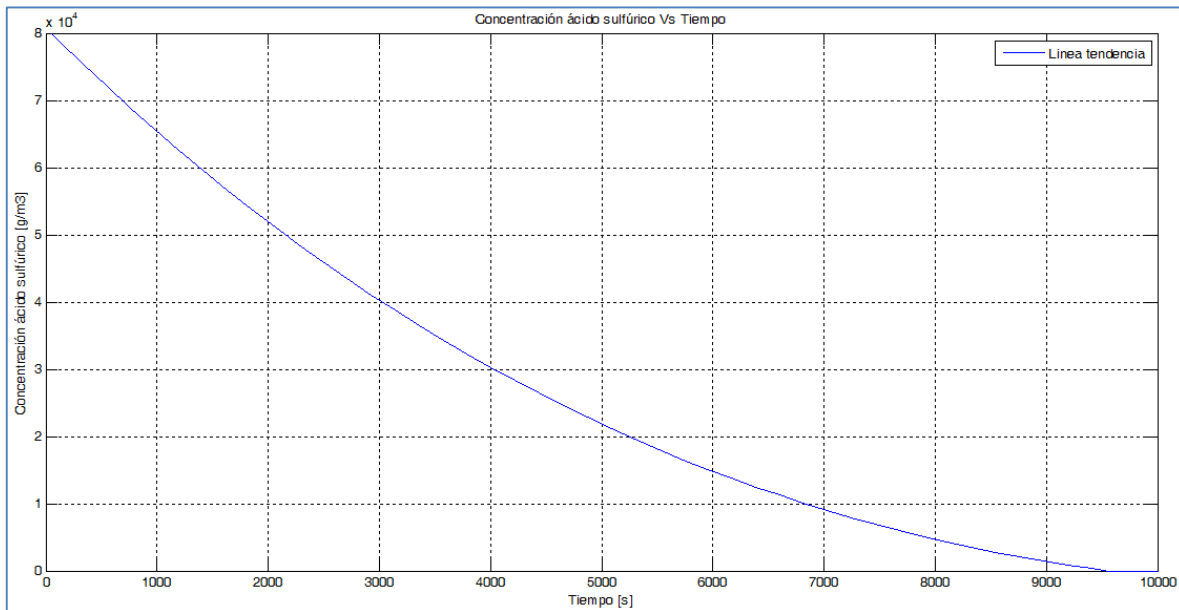
deje la mezcla, si no hay presencia de ácido no reaccionara el cobre sin importar la cantidad de aire comprimido y vapor que se le esté ingresando, lo cual representa perdidas para el proceso por el consumo energético injustificado.



**Figura 10.** Concentración de sulfato de cobre Vs Tiempo

Con el software MATLAB-SIMULINK es posible controlar las variables que inciden en el proceso representándolo en el modelo, para determinar las cantidades de energía necesarias que se deben ingresar al medio de reacción se itera, dándole valores diferentes para el flujo másico de aire, flujo másico de vapor y flujo másico de ácido sulfúrico, ya que uno de los límites impuestos por la naturaleza a las transformaciones energéticas establece que toda la energía que se le suministra a un proceso y que tiene una finalidad definida, no se podrá transformar útilmente, parte de esta se perderá en otras formas de energía en nuestro caso en particular el calor entregado por el vapor saturado es disipado al ambiente y el aire comprimido se está enviando a la atmosfera. La eficiencia de un proceso está definido como; (la energía real útil para un proceso/ la energía total suministrada al proceso). Los resultados arrojados por el software y que mejor representan el proceso energéticamente se describen a continuación.

Después de ingresar valores diferentes de tiempo y flujo másico de ácido al programa se obtiene la concentración del ácido sulfúrico en el medio de reacción lo cual implica que es ideal suministrar una cantidad específica de ácido en nuestro caso 527g/s para obtener este tipo de comportamiento, ya que a medida que se consume el ácido al reaccionar se está generando sulfato de cobre representando un uso eficiente de los recursos energéticos, ya que se puede llegar a controlar el ingreso de aire y vapor lo que representa una disminución tanto en los tiempos de operación como en el costo del producto final, (ver figura 11).



**Figura 11.** Concentración de ácido sulfúrico Vs Tiempo

### Concentración de sulfato de cobre

Los datos necesarios que se obtienen al tomar en campo y en nuestro caso los obtenidos por medio de la simulación indican que una vez se haya alcanzado una concentración de sulfato de cobre en el medio de reacción mayor o igual a  $481573.98 \text{ g/m}^3$  se debe proceder a descargar la reacción e iniciar una nueva. Con el sistema de control el cual pretende medir la conductividad eléctrica de la mezcla en el volumen de reacción puede indicar en qué momento ha terminado el proceso y que no es necesario seguir suministrando aire comprimido y vapor saturado.

Con la modelación del proceso se pudo determinar que la disolución del ácido sulfúrico en el agua aporta una gran cantidad de energía al volumen de reacción por ser exotérmico, llegando prácticamente a representar la energía mínima de activación. De la manera como se suministra actualmente el ácido sulfúrico al proceso no se aprovecha ese potencial energético del ácido porque se está ingresando en grandes cantidades y en intervalos de tiempo muy cortos, y al ser tal la reacción exotérmica del medio se está utilizando esta energía para evaporar parte del agua presente, si se le diera el manejo adecuado al flujo másico se podría llegar a la energía mínima de activación sin necesidad de suministrar vapor. Según los datos arrojados por el software y que más se acercan al flujo ideal es de  $0.29 \text{ L/s}$  hasta llegar a la masa necesaria en el medio, luego de terminar la adición se procederá a suministrar vapor el cual debe ser controlado por los límites de operación necesarios de la reacción que puede estar entre  $70$  y  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2.2 Análisis equipos aire comprimido

Los compresores utilizados actualmente en la planta productos Químicos Panamericanos son dos, de los cuales se da una breve descripción a continuación:

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

**Tabla 1.** Consumo compresor 1.

| Compresor N° 1 |    |   |       |                             |        |                               |                        |                              |
|----------------|----|---|-------|-----------------------------|--------|-------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Marca          |    | ELGI  |       |                             |        |                               |                        |                              |
| Especificación |    | Compresor de tornillos lubricados con desplazamiento positivo |       |                             |        |                               |                        |                              |
| Potencia       |    | Caudal  |       | Horas funcionamiento al mes | Tarifa | Energía consumida por una CFM | Costo mensual de 1 CFM | Costo mensual funcionamiento |
| Hp             | KW | CFM   | CFH   | Horas                       | \$/KWh | KW                            | \$/CFM                 | \$                           |
| 100            | 75 | 484   | 29010 | 720                         | 210    | 0,002585315                   | \$ 23.454              | \$ 11.340.000                |

Normalmente durante el proceso para la obtención de sulfato de cobre está en funcionamiento el compresor N° 1 cuando están los dos reactores en funcionamiento de lo contrario estará encendido el compresor N° 2 por su capacidad. De acuerdo a la capacidad de caudal que tienen los equipos, el fabricante especifica el factor de corrección por altura sobre el nivel del mar, donde Medellín está sometido a una presión atmosférica de 0.84 atm lo que implica que tiene una disminución en su capacidad presentando una afectación cercana al 10% en el caudal entregado a 100 Psig.

**Tabla 2.** Consumo compresor 1.

| Compresor N° 2 |    |   |       |                             |        |                               |                        |                              |
|----------------|----|---|-------|-----------------------------|--------|-------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Marca          |    | ELGI  |       |                             |        |                               |                        |                              |
| Especificación |    | Compresor de tornillos lubricados con desplazamiento positivo |       |                             |        |                               |                        |                              |
| Potencia       |    | Caudal  |       | Horas funcionamiento al mes | Tarifa | Energía consumida por una CFM | Costo mensual de 1 CFM | Costo mensual funcionamiento |
| Hp             | KW | CFM   | CFH   | Horas                       | \$/KWh | KW                            | \$/CFM                 | \$                           |
| 70             | 55 | 320   | 19200 | 720                         | 210    | 0,002864583                   | \$ 25.988              | \$ 8.316.000                 |

### 2.3 Resultados Análisis eficiencia térmica caldera

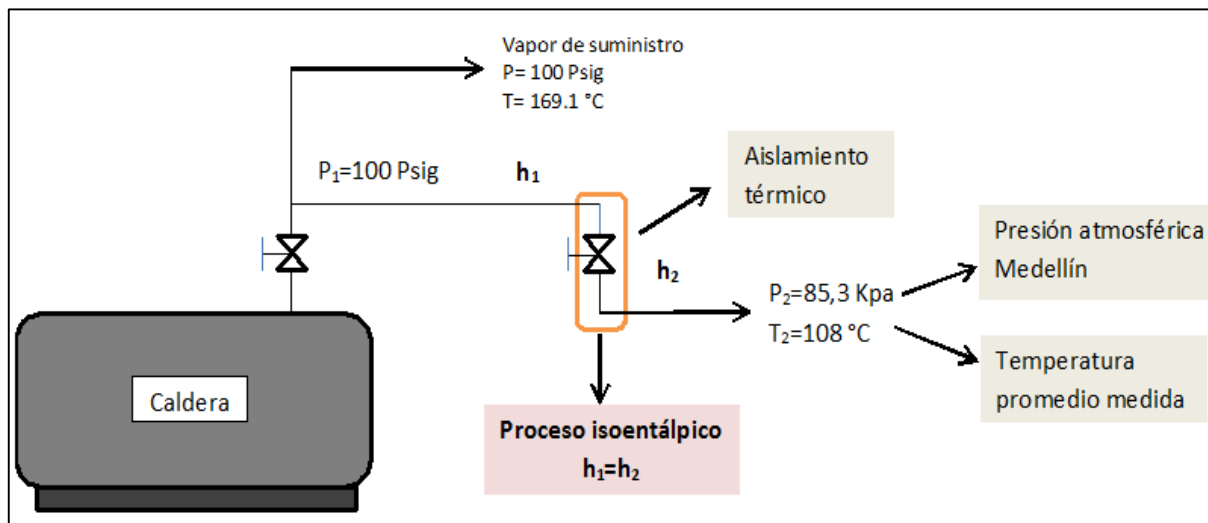
Después de realizar el experimento en la planta Productos Químicos Panamericanos sede Girardota se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 3.** Datos presión.

| Lugar medición       |     |      |
|----------------------|-----|------|
| Presión atmosférica  | Kpa | 85.3 |
| Temperatura ambiente | °C  | 29   |

| Caldera         |      |         |
|-----------------|------|---------|
| Presión caldera | Psig | 100     |
| Presión caldera | Kpa  | 689.476 |

| Datos experimentales        |               |                  |
|-----------------------------|---------------|------------------|
| N° Lectura                  | Presión (Kpa) | Temperatura (°C) |
| 1                           | 85.3          | 106              |
| 2                           | 85.4          | 110              |
| 3                           | 85.5          | 108              |
| 4                           | 85.6          | 106              |
| 5                           | 85.7          | 108              |
| <b>Temperatura promedio</b> |               | 107,6            |



**Figura 12.** Esquema conexión calorímetro.

Luego de haber obtenido los datos necesarios procedemos a realizar los cálculos:

$p_2 = 85,3 \text{ Kpa} \rightarrow$  Presión atmosférica

$T_2 = 108 \text{ °C} \rightarrow$  Temperatura a la salida de la válvula de estrangulamiento

Con  $P_2$  y  $T_2 \rightarrow$  Hallamos  $\rightarrow h_2$

Por tablas para vapor sobrecalentado  $P = 1 \text{ bar}$

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

| T °C | h [KJ/Kg]      |
|------|----------------|
| 100  | 2677,84        |
| 108  | h <sub>2</sub> |
| 120  | 2717,2         |

Es necesario interpolar para hallar el valor de h<sub>2</sub>

$$\frac{(108 - 100)^{\circ}\text{C}}{(h_2 - 2677.84) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = \frac{(120 - 100)^{\circ}\text{C}}{(2717.2 - 2677.84) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}$$

$$h_2 = \left[ \frac{(108 - 100)^{\circ}\text{C} (2717.2 - 2677.84) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}{(120 - 100)^{\circ}\text{C}} \right] + 2677.84 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$h_2 = 2693.58 \approx 2694 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Conociendo el valor de la presión de la caldera P<sub>1</sub> = 100 Psig le adicionamos la presión atmosférica para obtener la presión absoluta y por consiguiente buscar la temperatura de saturación del vapor.

$$P_1 = 100 \text{ Psig} \rightarrow 689,476 \text{ Kpa} \rightarrow \text{Presión trabajo caldera}$$

$$P_{\text{atm}} = 85,3 \text{ Kpa}$$

$$P_{\text{abs}} = P_1 + P_{\text{atm}} = 689,476 \text{ Kpa} + 85,3 \text{ Kpa} = 774,78 \text{ Kpa}$$

Con la P<sub>abs</sub> = 774,78 Kpa hallamos la presión de saturación del vapor por tablas

$$T_{\text{sat}} = 169,1^{\circ}\text{C}$$

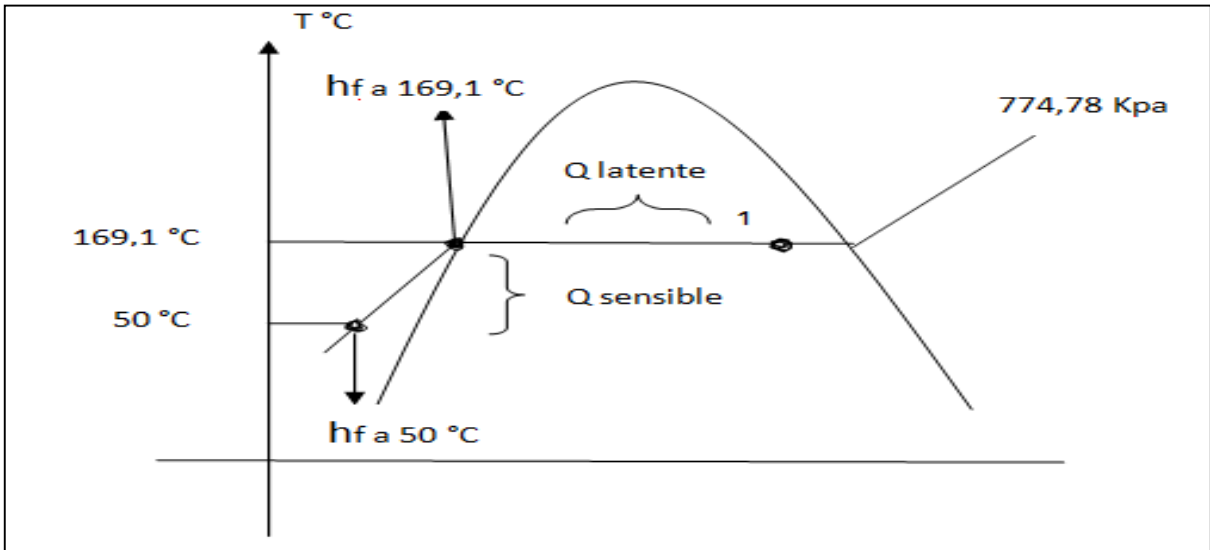
Como en la válvula de estrangulamiento se da un proceso isoentálpico entonces:

$$h_2 = h_1 = 2694 \text{ KJ/Kg}$$

Conociendo la presión absoluta de la caldera y la entalpia del vapor podemos hallar la calidad del

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 774,78 \text{ Kpa} \\ h_1 = 2694 \text{ KJ/kg} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_1 = 0,96 \\ \text{Calidad del vapor a la salida de la caldera} \end{array}$$

Conocemos también la temperatura promedio de entrada del agua a la caldera 50 °C



**Figura 13.** Diagrama T<sub>p</sub> del agua.

Es necesario hallar la entalpia del agua a la entrada de la caldera la cual se encuentra a 50 °C.

Suposición: el agua para poder ingresar a la caldera debe tener un poco más de presión que la caldera al momento del ingreso pero en nuestro caso la vamos a tomar igual.

$$\begin{matrix} P_1 = 774,78 \text{ Kpa} \\ T_{\text{agua}} = 50 \text{ °C} \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} h_{\text{agua}} = 210 \text{ KJ/Kg} \\ \text{Por tablas termodinámicas} \end{matrix} \right.$$

Para hallar  $h_f$  a 50 °C utilizamos la temperatura del agua de alimentación y la calidad en ese momento igual a cero.

$$h_f \text{ a } 50 \text{ °C} \rightarrow \begin{matrix} T_{\text{agua}} = 50 \text{ °C} \\ X = 0 \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} h_{\text{agua}} = 209,3 \text{ KJ/Kg} \end{matrix} \right.$$

Como se evidencia la diferencia entre la entalpia del agua hallándola con la presión de la caldera y determinándola con la calidad presenta un porcentaje de error muy mínimo.

Para hallar el Cp promedio del agua necesitamos hallar la temperatura promedio

$$T_{\text{promedio agua}} = \left( \frac{169,1 - 50}{2} \right) = 110 \text{ °C}$$

Para hallar el Cp utilizamos las tablas termodinámicas

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

$$\begin{array}{l}
 \text{Cp promedio a } 110\text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T_{\text{prom}} = 110\text{ }^{\circ}\text{C} \\
 P_1 = 774,78\text{ KJ/Kg}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}} \right\} \text{Cp} = 4,227\text{ KJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$\begin{array}{l}
 h_{\text{fa}} \text{ a } 169,1\text{ }^{\circ}\text{C} \\
 T = 169,1\text{ }^{\circ}\text{C} \\
 X = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}} \right\} 715,1\text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{\text{sensible}} = h_f \text{ a } 169,1\text{ }^{\circ}\text{C} - h_f \text{ a } 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{sensible}} = (715,1 - 210) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 505,1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Otra forma

$$Q_{\text{sensible}} = C_p H_2O_{\text{promedio}} (T_2 - T_1)$$

$$Q_{\text{sensible}} = \left( 4,227 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right) (169,1 - 50)^{\circ}\text{C} = 503,4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{\text{latente}} = h_1 - h_f \text{ a } 169,1\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{latente}} = (2694 - 715,1) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 1978,9 \approx 1979 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}}$$

$$Q_{\text{total}} = (505,1 + 1979) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 2484 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Luego de tomar datos en planta sobre el consumo de agua este nos arroja como resultado promedio 578 Kg/h.

Balace de masa vapor

$$\dot{m}_{\text{agua\_entrada}} = \dot{m}_{\text{vapor\_generado}} \rightarrow \text{Considerando que no hay fugas en el sistema.}$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 578 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times \frac{1\text{ lbm}}{0,453\text{ Kg}} = 1276 \frac{\text{lbs vapor}}{\text{h}} \rightarrow \text{Vapor que se esta suministrando}$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 578 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times \frac{1\text{ h}}{3600\text{ s}} = 0,1605 \frac{\text{kg}}{\text{S}}$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = Q_{\text{total}} * \dot{m}_{\text{vapor}}$$

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \left(2484 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right) \left(0,1605 \frac{\text{Kg}}{\text{S}}\right) = 398,682 \text{ Kw} \quad \text{Calor necesario para evaporar el agua.}$$

$$\dot{Q}_{\text{Combustible}} = \text{PCI} * \dot{m}_{\text{Combustible}}$$

$$\dot{m}_{\text{Combustible}} = 139 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{3600 \text{ s}} = 0,038616 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \quad \text{Valor promedio medido en campo}$$

$$\text{PCI}_{\text{carbón}} = 10800 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \rightarrow \text{ver anexo B.}$$

$$\text{PCI}_{\text{carbón}} = 10800 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \times \frac{1\text{lbm}}{0,453\text{Kg}} \times \frac{1,055 \text{ KJ}}{1\text{Btu}} = 25152,31 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\dot{Q}_{\text{combustible}} = \left(25152,31 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right) \left(0,038616 \frac{\text{Kg}}{\text{S}}\right) = 971,28 \frac{\text{KJ}}{\text{S}} \approx 971,28\text{KW}$$

$$n_{\text{termica-caldera}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Vapor}}}{\dot{Q}_{\text{combustible}}} \times 100$$

$$n_{\text{termica-caldera}} = \frac{398,682 \text{ Kw}}{971,28 \text{ Kw}} \times 100 = 41,04\%$$

Con los resultados obtenidos podemos concluir que la caldera esta sub-utilizada, ya que esta diseñada para entregar 6600 lbs vapor/h y esta trabajando aproximadamente al 20% de su capacidad nominal. Tambien se nota la afectación en la eficiencia térmica la cual puede ser el reflejo del poco mantenimiento y la operación inadecuada que se efectua a este equipo.

## 2.4 Caracterización de las variables

Actualmente se le estan ingresando a la reacción 250 CFM lo que es equivalente a 118 L/s, estequiometricamente el flujo másico de aire que debe salir es el minimo para garantizar que el oxigeno que entra este reaccionando por completo y que no represente perdidas tan significativas para el proceso. Acontinuación se describe el procedimiento para obtener que porcentaje de aire se esta aprovechando en la reacción:

$$\dot{V}_{\text{Aire-entra}} = 250 \text{ CFM} = 118 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$\rho_{\text{Aire}} = 7,898 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow \text{Densidad del aire a 100 Psig}$$

$$\text{Fracción másica oxigeno} = 0,21$$

$$\dot{m}_{\text{Oxigeno-entrada}} = \rho_{\text{Aire}} * \dot{V}_{\text{Aire-entra}} * \text{Fracción másica oxigeno}$$

$$\dot{m}_{\text{Oxigeno-entrada}} = \left(7,898 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right) \left(118 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) (0,21)$$

$$\dot{m}_{\text{Oxigeno-entrada}} = 195,71244 \frac{\text{g}}{\text{s}} \rightarrow \text{Flujo másico de oxigeno que ingresa a la reacción en 1s}$$



|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

Luego de de resolver el sistema de ecuaciones utilizando el software MATLAB-SIMULINK obtuvimos que el flujo másico de oxígeno que se consume en el medio de reacción y el flujo másico de oxígeno que sale del volumen de reacción son:

$$\dot{m}_{\text{Oxígeno-consume}} = 87,81244 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{Oxígeno-sale}} = 107,9 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Para determinar a que caudal corresponden los 107,9 g/s vamos a utilizar la siguiente formula:

$$\dot{V}_{\text{Aire-sale}} = \frac{(\dot{m}_{\text{Oxígeno-sale}})}{(\text{Fracción másica de oxígeno})(\rho_{\text{Aire}})} \left[ \frac{\text{L}}{\text{S}} \right]$$

$$\dot{V}_{\text{Aire-sale}} = \frac{(107,9 \frac{\text{g}}{\text{s}})}{(0,21)(7,898 \frac{\text{g}}{\text{L}})} = 65,05 \frac{\text{L}}{\text{s}} \rightarrow \text{Aire que se esta enviando a la atmosfera}$$

$$\dot{V}_{\text{Aire-sale}} = 65,05 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 137,83 \text{ CFM}$$

$$n_{\text{Proceso}} = \frac{\dot{V}_{\text{Aire-sale}}}{\dot{V}_{\text{Aire-entra}}}$$

$$n_{\text{Proceso}} = \frac{(137,83 \text{ CFM})}{(250 \text{ CFM})} \times 100 = 55,132\%$$

Podemos concluir que 44,868% del aire que se está ingresando a la reacción no esta realizando ningún aporte, de lo contrario esta impactando en el margen de ganacia del producto final.

#### 2.4.1 Tiempos necesarios para la obtención del producto

De acuerdo a los resultados obtenidos despues de haber ingresado diferentes valores de tiempo para la simulación del proceso, se puede determinar que el valor mas cercano donde la concentración de ácido sulfúrico se hace cero es aproximadamente a las 4 horas, y asi mismo la concentración de sulfato de cobre sobrepasa el valor estimado de laboratorio de 481573.98 g/m<sup>3</sup>, el cual es necesario para darle fin a la reacción y proceder a iniciar la siguiente.

#### 2.4.2 Cantidad de energía liberada en el medio

Luego de resolver el sistema de ecuaciones con el sotware MATLAB-SIMULINK obtenemos que la energía liberada en el medio es de 11659.68 J/s

#### 2.4.3 Flujo de calor necesario para llevar a cabo la reacción

El flujo de calor necesario para llevar a cabo la reacción es de 400 KJ.

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

## 2.5 Cálculo consumo de vapor requerido

Para el consumo de vapor requerido fue necesario iterar dándole valores distintos de flujo másico y presión al modelo para poder establecer cual es el suministro necesario, los resultados más aproximados a lo ideal son de 1200 Lbm/h vapor saturado a 169 °C.

## 2.6 Determinación de los equipos necesarios para el suministro de aire comprimido.

Al darle valores diferentes de presión y caudal al modelo del proceso el cual tiene programado el cálculo del flujo másico de aire dependiendo de la presión atmosférica y la densidad del mismo, se obtuvo que las condiciones más apropiadas del suministro de aire para oxidar la mezcla son; 110 CFM a 70 Psig garantizando que cerca del 85% de oxígeno va a reaccionar y el restante será liberado a la atmósfera.

## 2.7 Rangos de presión y temperatura de trabajo necesarios para el proceso

Luego de realizar la modelación se pudo determinar cuáles eran los rangos de temperatura necesarios para el proceso, teniendo en cuenta que el límite inferior de temperatura debe estar por encima del valor necesario para que se de la reacción química, los valores obtenidos se presentan a continuación:

- Temperatura entre los 70 y 80°C.
- Presión del aire de suministro 75 Psig.

## 2.8 Cuantificación del consumo de energía

### Consumo de energía de los dispositivos involucrados en el proceso

Para establecer el consumo actual de los dispositivos se evaluaron en campo cuáles son los porcentajes de carga bajo los cuales están operando, también fue necesario consultar en los manuales de los fabricantes los datos de potencia eléctrica instalada tanto en la caldera como para los equipos de aire comprimido y en nuestro caso en particular la caldera por el consumo de energía térmica. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Para la generación de vapor actualmente se le está aportando 971.28 KW térmicos, la potencia eléctrica instalada en la caldera para el funcionamiento de los motores forzado e inducido 30 KW/h. El equipo de aire comprimido que está operando actualmente representa un consumo de 75 KW/h.

## 2.9 Energía ingresada al proceso actualmente

El total de energía suministrada actualmente al proceso se describe a continuación;

- Energía eléctrica: 110 KW/h
- Energía Térmica aportada por el combustible 971.28 KW.

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

### 2.10 Costos energéticos y tiempos de producción

El consumo eléctrico medido en el tiempo que tarda la reacción aproximadamente en 36 horas es de 5280 KW/h los cuales representan un costo de 1.108.800 \$ , el costo de la energía térmica que se está ingresando para evaporar el agua es de 880.815 \$

El ahorro que puede representar el manejo adecuado de los recursos energéticos y de personal disponible se describe a continuación:

Aire comprimido

Consumo actual aire comprimido: 250 CFM

Consumo requerido por el proceso: 110 CFM

Costo mensual de 1 CFM: \$ 25.988

Ahorro aire comprimido = (Consumo actual aire comprimido – Consumo requerido aire comprimido por el proceso x Costo mensual de 1 CFM).

Ahorro Proceso= (250 CFM – 110 CFM) x (\$200) = \$ 3.638.320

Vapor sobrecalentado

Luego del análisis realizado de manera experimental de la eficiencia térmica de la caldera se obtuvo que está cerca del 41%. Actualmente no se realiza el mantenimiento preventivo del equipo según lo establecido por el fabricante ni se opera de manera adecuada tomando como ejemplo la calidad del agua que se le está ingresando, la cual no es la mejor debido al tratamiento químico que se le da, lo que representa una acumulación de lodos que sirven de aislamiento térmico dificultando la transferencia de calor hacia el interior de la caldera.

Efectuando lo descrito anteriormente y determinando cual es la cantidad de combustible necesaria para el proceso se podría obtener una eficiencia térmica cercana al 65 % lo cual representaría un ahorro significativo para la compañía. A continuación se describen los cálculos:

Eficiencia térmica actual caldera

$$\eta_{\text{térmica-caldera}} = \frac{398,682 \text{ KW}}{971,28 \text{ KW}} \times 100 = 41,04 \%$$

Realizando los cálculos mediante iteraciones obtenemos que para el objetivo que nos trazamos de aumentar la eficiencia térmica de la caldera del 41 al 65% obtenemos lo siguiente:

$$\eta_{\text{térmica-caldera}} = \frac{398,682 \text{ KW}}{613,35 \text{ KW}} \times 100 = 65.0 \%$$

Para que el combustible aporte una energía equivalente a 971.28 KW es necesario contar con un flujo másico del combustible igual a 139 kg/h.

La cantidad de energía necesaria para evaporar el agua es de 398,682 KW, partiendo de que se va a aumentar la eficiencia térmica de la caldera al realizar la operación y el mantenimiento adecuado

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

del 41% al 65% la energía necesaria se convierte de 398,682 KW a 613,35 KW lo cual requiere un flujo másico del combustible igual a 88 Kg/h.

Teniendo en cuenta que el precio de carbón por kilogramo es de \$ 200 se presentan las siguientes situaciones:

- Horas funcionamiento: 720 h
- Flujo másico combustible actual operando la caldera bajo una eficiencia aproximada del 41%: 139 Kg/h.
- Flujo másico combustible requerido operando la caldera bajo una eficiencia aproximada del 65%: 88 Kg/h.

Consumo actual (\$) = (Horas funcionamiento x Flujo másico actual x Precio Comb/Kg)

Consumo actual (\$) = (720h x 139 Kg/h x 200\$/Kg)

Consumo actual (\$) = 20,016,000

Consumo requerido (\$) = (Horas funcionamiento x Flujo másico combustible requerido x Precio comb/Kg)

Consumo requerido (\$) = (720h x 88Kg/h x 200\$/Kg)

Consumo requerido (\$) = 12,672,000

Ahorro energía térmica (\$) = (Consumo actual – Consumo requerido)

Ahorro energía térmica (\$) = (20,016,000 – 12,672,000)

Ahorro energía térmica (\$) = 7,344,000

Mano de obra

Actualmente el proceso para la obtención de sulfato de cobre requiere de 3 operarios por turno lo que representas unos costos que se describiran a continuación:

- Numero operarios por turno: 3
- Hora operario: 14,375 \$
- Tiempo por reacción: 24 h

Si multiplicamos el costo por hora de cada operario y el tiempo que tarda en obtener una reacción se tiene que:

Costo operación por reacción (\$) = (Numero operarios x costo hora operario x Tiempo por reacción)

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

Costo operación actual por reacción (\$): (3 Operario x 14,375 \$ Operario/h x 24 h)

Costo operación actual por reacción (\$): 1,035,000

Luego de implementarse el sistema de control a las variables que inciden en el proceso se espera una disminución en el tiempo de producción de 24 a 4 horas. Estos valores se pueden expresar de la siguiente manera:

Costo operación por reacción luego de implementar el sistema (\$): (Numero operarios x costo hora operario x Tiempo por reacción)

Costo operación por reacción luego de implementar el sistema (\$): (3 Operario x 14,375 \$ Operario/h x 4h)

Costo operación por reacción luego de implementar el sistema (\$): 172,500

Ahorro costos operación por reacción (\$): (Costo operación actual por reacción - Costo operación por reacción luego de implementar el sistema)

Ahorro costos operación por reacción (\$): (1,035,000 – 172,500)

Ahorro costos operación por reacción (\$): 862,500

### 2.11 Eficiencia del proceso actual

La eficiencia actual del proceso esta dada por el consumo energético actual del proceso y el consumo ideal obtenido tras la modelación, los datos mas relevantes para el proceso son; 1). El tiempo que tarda actualmente en obtener una reacción está entre 24 y 36 horas debido a que no se efectua el control necesario de las variables involucradas, según el modelo la reacción tardaria 4 horas aproximadamente realizando el control adecuado de las variables. 2). El consumo de aire actualmente esta muy por encima de la demanada ideal del proceso el cual se obtuvo partiendo del análisis estequeometrico, por ende los costes energéticos son muy elevados. 3). La eficiencia actual de la caldera afecta los costes de fabricación del producto, anexo a esto se le esta ingresando un poco mas de vapor de lo necesario para el proceso.

Para establecer la eficiencia actual vamos a evaluar la cantidad de energía que se le ingresa en las 24 horas que tarda como minimo la reacción frente a la cantidad de energía que se le debe ingresar en las 4 horas que tarda según los datos arrojados por la modelación, siendo lo mas razonables posible con el manejo de los recursos disponibles.

$$\eta_{\text{Proceso}} = \frac{(\text{Energía útil proceso})}{(\text{Energía suministrada proceso})} = \frac{(4h * 720,24 * 70KW)}{(24h * 971,28KW * 110KW)} * 100 = 7,86\%$$

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

## 2.12 Modelamiento de la solución al problema

Para determinar los valores de energía necesarios para el proceso se iteró en el software Matlab-Simulink dándole valores distintos al flujo másico de ácido sulfúrico, al suministro de aire comprimido y vapor como fuente de energía necesaria para acelerar la reacción. Se evidencia dentro del proceso de simulación la necesidad de controlar el ingreso de ácido a el medio, ya que este representa un aporte de energía significativo para el volumen de reacción, y en el procedimiento establecido actualmente para la obtención de este producto se dosifica en grandes cantidades y en lapsos de tiempos muy largos lo que limita el aporte de la energía del ácido al entrar en contacto con el agua durante el tiempo de reacción, por esto es necesario establecer un flujo másico constante de ácido sulfúrico hasta que se llegue a la adición de masa total definida para el proceso. Este flujo másico ideal se obtuvo del modelo del proceso programado en Matlab-Simulink el valor más cercano para obtener este comportamiento es de 0,29 g/s lo cual se puede lograr mediante la instalación de un variador de frecuencia donde se puedan establecer parámetros de acuerdo al flujo volumétrico nominal de la motor-bomba utilizada, limitándolo necesariamente a que suministre la cantidad indicada.

El flujo volumétrico de aire que se está ingresando actualmente a la reacción es de 250 CFM (pies cúbicos por minuto) a 100 Psig, y según el modelo del proceso solo se requieren 1100 CFM a 100 Psig para poder garantizar que se oxide la mezcla. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede determinar que el equipo necesario para este proceso no es un soplador de lobulos debido a que estos entregan grandes cantidades de caudal pero a muy bajas presiones y nuestro proceso requiere aire mínimo a 70 Psig, por tal motivo se opta por proponer que se destine para este proceso un compresor existente en la planta y que se utiliza muy poco el cual entrega alrededor de 140 CFM a 100 Psig con su motor de 30 KW representando un ahorro cercano al 50 % frente al equipo que se está utilizando actualmente.

El flujo másico de vapor que se está suministrando al proceso es aproximado al valor real necesario para llevar a cabo la reacción, sin embargo es importante considerar el mantenimiento de la caldera para mejorar su eficiencia la cual está muy baja, representando costes elevados en la operación de esta. A pesar de que el flujo másico de vapor es 1276 Lbm/h este representa un aporte de energía signficante y que no está siendo controlado llevando la reacción hasta el punto de ebullición lo cual no es necesario según el modelo del proceso programado en Matlab-Simulink el cual presenta los límites de temperatura necesarios estando dentro de los 70-80 °C, por ende se propone el control mediante una PT100 que permita el ingreso de vapor cuando se encuentre bajo el límite superior y mantenga su control dentro de los limites programados. Para realizar el sistema de control es necesario utilizar el software Step 7<sup>®</sup> disponible en la universidad. La programación consta de escoger un bloque dentro de la librería disponible en el software para escalar la señal analógica de 4-20 mA entregada por la PT100, la cual trae su transmisor incorporado, luego de que se ingresen los limites inferior y superior de operación del sistema se procede a entregar una señal digital la cual permitirá o restringirá el ingreso de vapor al medio de

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

reacción garantizando que la energía aportada se utilice de la mejor manera sin generar pérdidas significativas para el proceso de producción.

Para determinar cuando la reacción está en su punto final de acuerdo a la concentración de sulfato de cobre se propone la instalación de un equipo que mida la conductividad eléctrica en el medio, transmitiendo una señal analógica de 4-20 mA la cual puede ser escalizada nuevamente mediante un bloque de “Scale” en el software Step 7<sup>®</sup> garantizando que cuando se llegue a la concentración de sulfato de cobre en el volumen de reacción, datos que son determinados en el laboratorio se pueda dar fin al proceso poniendo un stop al ingreso de vapor y de aire comprimido hasta que se descargue la reacción y se dispongan a iniciar nuevamente el ciclo. Tanto el proceso de control de temperatura como el proceso para determinar la concentración de sulfato de cobre en el medio se describe la programación en los anexos.

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

## 3 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- El intervalo actual de tiempo en el cual se hacen mediciones de acidez como control de reacción, no permiten que el operario tome una decisión oportuna en cuanto a la adición de ácido sulfúrico, extendiendo considerablemente el tiempo de reacción.
- La adición constante de ácido sulfúrico a lo largo de la reacción permite obtener un tiempo de proceso significativamente más corto que el empleado actualmente, esto permite lograr una disminución en la mano de obra y permite aumentar la capacidad instalada de la planta de producción.
- El conocimiento de la interacción de todas las variables de proceso y el modelamiento matemático permiten hacer predicciones del comportamiento del proceso, lo que facilita la toma de decisiones sobre el mismo, permitiendo una optimización técnico-económica a corto plazo.
- El manejo inadecuado de los recursos energéticos está afectando significativamente el margen de ganancia del producto lo cual representa una baja competitividad de la compañía en el mercado nacional e internacional.
- El equipo para la generación de vapor está siendo sub-utilizado lo cual genera costes elevados por la operación inadecuada, ya que se recomienda por parte del fabricante que las condiciones de operación para entregar vapor estén por encima del 70% de su capacidad nominal y luego de realizar el estudio se puede concluir que está operando al 20% de su capacidad.
- Para un trabajo futuro se recomienda realizar el estudio a profundidad con volúmenes de reacción distintos y mayores al presentado, donde se pueda establecer una adición de ácido sulfúrico mayor, demostrando que el aporte de energía entregado por la adición constante de ácido sulfúrico suple la necesidad de utilizar una caldera para este proceso.



|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

## REFERENCIAS

---

El-Sayed, Y. M. (2003). *THE THERMOECONOMICS OF ENERGY CONVERSIONS*. Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: ELSERVIER Ltd.

GREEN, R. H. (1999). *CHEMICAL ENGINEERS'*. NEW YORK: McGraw-Hill.

Holman. (1999). *Transferencia de calor, fenómenos de transporte*.

Javier García de Jalon, J. I. (Diciembre de 2005). *Aprenda MATLAB 7.0 como si estuviera en primero*. Madrid, España.

Ludwig, E. (2001). *Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants*. Elsevier.

Miriam Vilaragut, A. C. (1996-1998). *Metodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifasicos*. La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL).

Mondejar, J. A. (00 de 07 de 2003). *Google academico*. Recuperado el 25 de 06 de 2015, de Google Academico :  
[http://www.dea.icaei.upcomillas.es/jarm/Asignaturas/AutomatizacionIndustrial\\_3itiei/transparencias/7gemma.pdf](http://www.dea.icaei.upcomillas.es/jarm/Asignaturas/AutomatizacionIndustrial_3itiei/transparencias/7gemma.pdf)

Nevarez, F. V. (2014). *Calidad del vapor en la caldera*.

Parker Hannifin Corporation. (2003). *Tecnología neumática industrial*. En P. H. Corporation, *Tecnología neumática industrial* (págs. 11-12). Brasil: Jacarei-Sp - Brasil.

Restrepo, E. P. (2014). *Hacia una cultura de la gestión energética empresarial*. Medellín-Colombia: INDISA.

Rosseau, F. &. (2004). *Principios Elementales de los procesos Químicos 3ra ed.*

Varela, A.E.; Arias, A. y Reyes, Y. " Kinetic of copper-sulfate pentahydrate production from scrap copper". Maracaibo, 2003.

Yunus A. Cengel. *Transferencia de calor, 3ra edición*.

|  |  |         |            |
|--|--|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | <b>INFORME FINAL DE<br/>TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|  |  | Versión | 03         |
|  |  | Fecha   | 2015-01-22 |

## ANEXOS

### Anexo A. Datos técnicos caldera

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| MARCA:                          | JCT  |
| CAPACIDAD:                      | 200 BHP  |
| TIPO:                           | A carbón piro-tubular a camisa húmeda                              |
| PRESIÓN DE DISEÑO:              | 165 PSI  |
| PRESIÓN DE TRABAJO:             | 150 PSI  |
| PRODUCCIÓN DE VAPOR ESTANDAR:   | 6900 Lbs vapor/h, agua alimentación a 100 °C y vapor a 0 Psig      |
| PRODUCCIÓN DE VAPOR S/TRABAJO:  | 6600 Lbs vapor/h, agua de alimentación a 100 °C y vapor a 150 Psig |
| CONSUMO MÁXIMO DE CARBÓN:       | 272 Kg/h carbón de 11200 BTU/Lb                                    |
| TIPO DE ALIMENTACIÓN DE CARBÓN: | Automática parrilla viajera  |
| AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR: | 1000 Pies <sup>2</sup>   |
| EFICIENCIA TÉRMICA:             | 78% +/- 2%   |
| PESO CALDERA VACIA:             | 24 TON   |
| DIMENSIONES CALDERA:            | Largo: 450 cm, Ancho: 243 cm, Alto: 289 cm                         |
| POTENCIA ELÉCTRICA INSTALADA:   | 20 Kw  |

### Anexo B. Ficha técnica carbón

#### Ficha técnica carbón – “Almendra”

- 1.- Producto: Carbón sub-bituminoso.
- 2.- Especificación: Según requerimientos de Planta.
- 3.- Uso específico: Generación de Vapor.
- 4.- Composición química (análisis próximo como se recibe)
  - Carbono Fijo: 44,0 - 46.0 %
  - Azufre: 0,4 % máx.
  - Materias Volátiles: 38,0 – 40,0 %
  - Cenizas: 6 % máx.
  - Humedad Total: 10 % máx.

|  |                                      |         |            |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
| <br>Institución Universitaria | INFORME FINAL DE<br>TRABAJO DE GRADO | Código  | FDE 089    |
|  |                                      | Versión | 03         |
|  |                                      | Fecha   | 2015-01-22 |

Poder Calorífico Bruto: 10.800 a 11.000 BTU/Lb.

5.- Muestreo: De acuerdo a la norma ASTM (D7256 y D7256-M, D2234).

6.- Análisis químico: De acuerdo a la Norma ASTM (D3302-10, D3173-11, D3174-11, D3175-11, D3172a, D4239-12, D5865-11<sup>a</sup>)

7.- Granulometría: "Almendra"

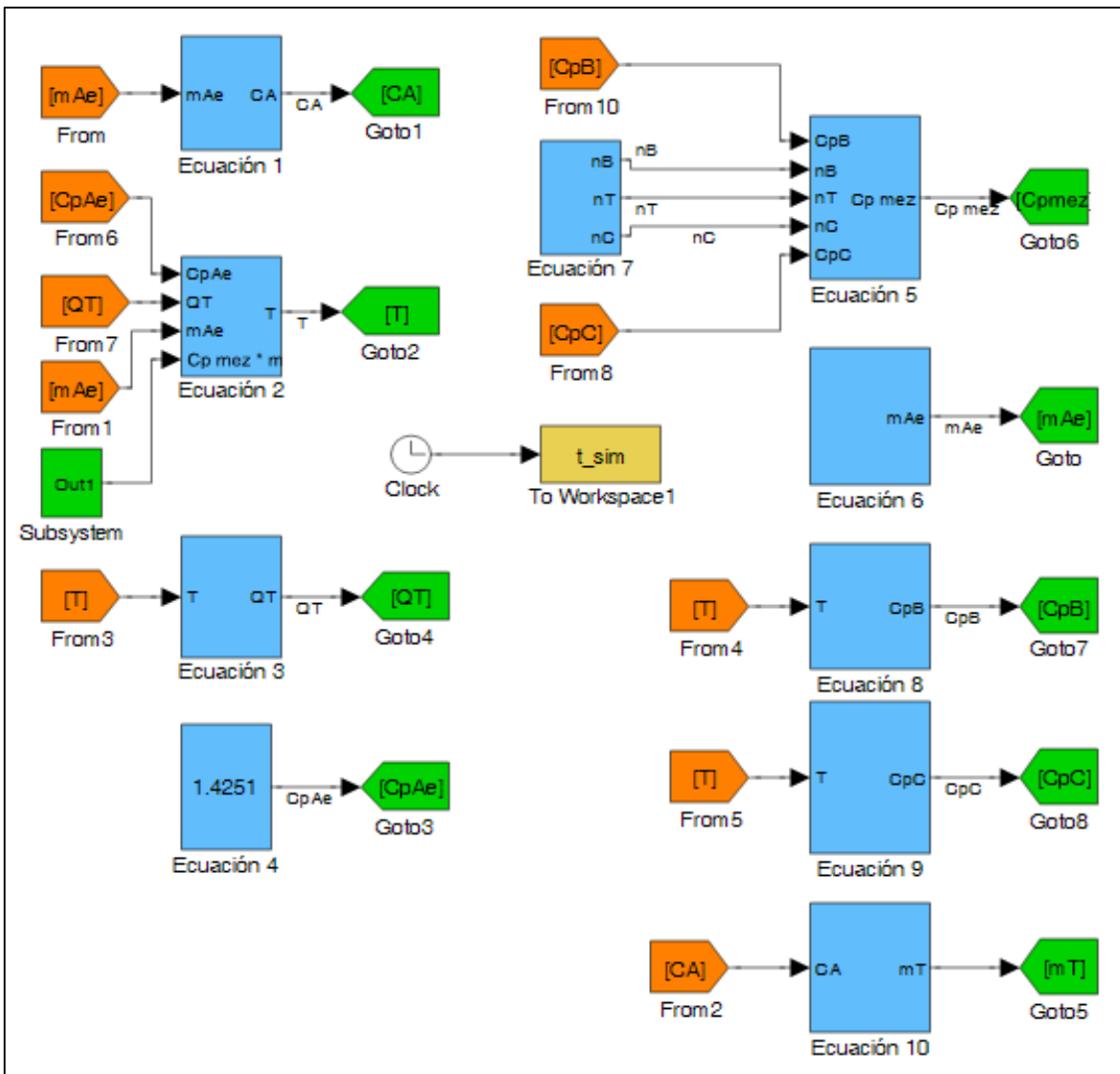
95% entre  $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{2}$ "

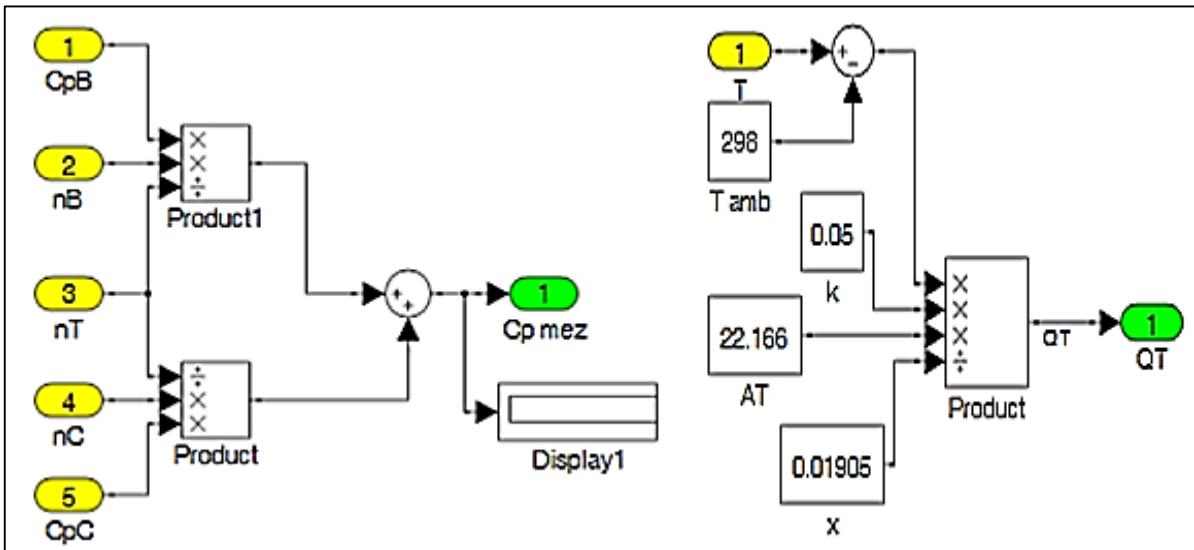
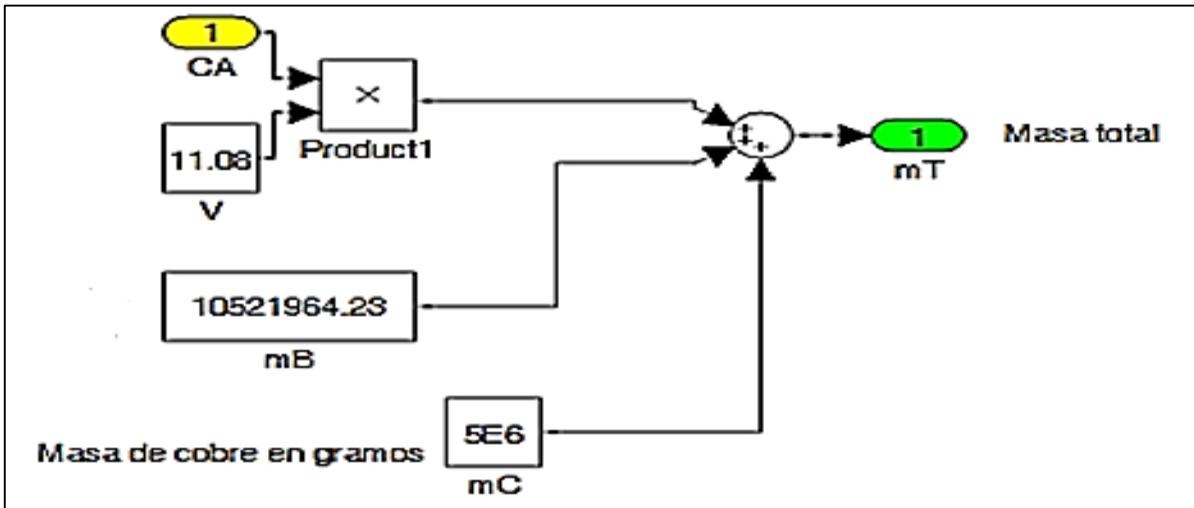
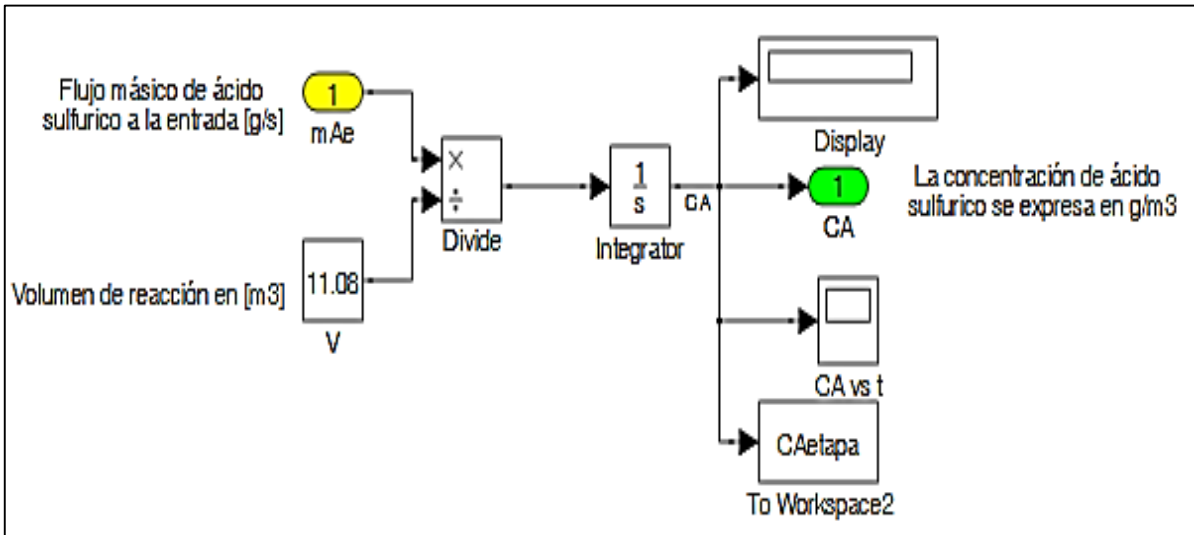
5% < a  $\frac{1}{4}$  "

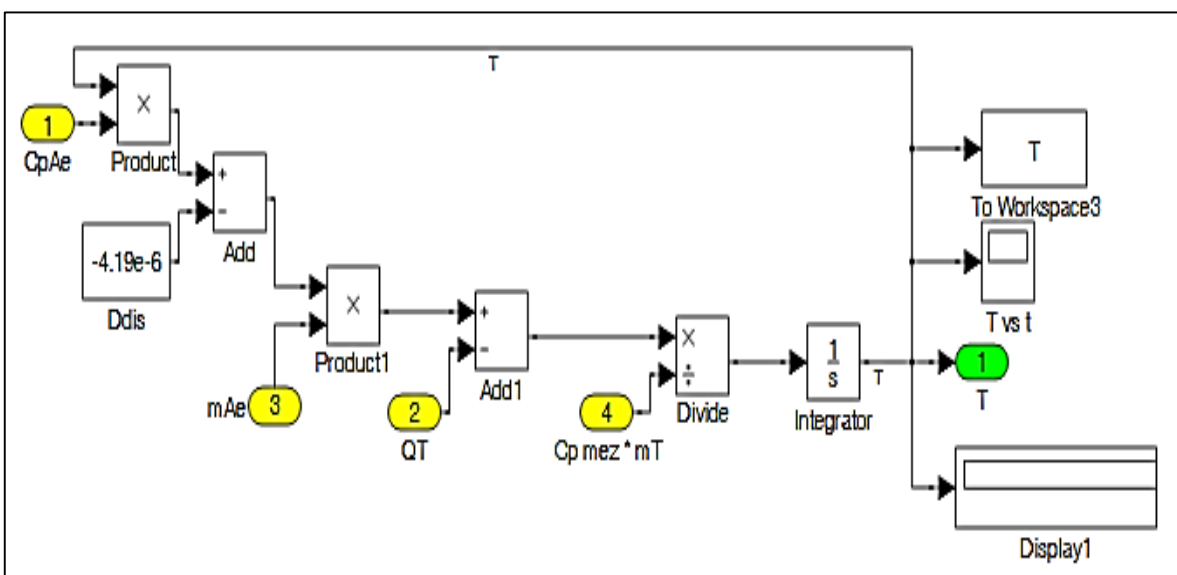
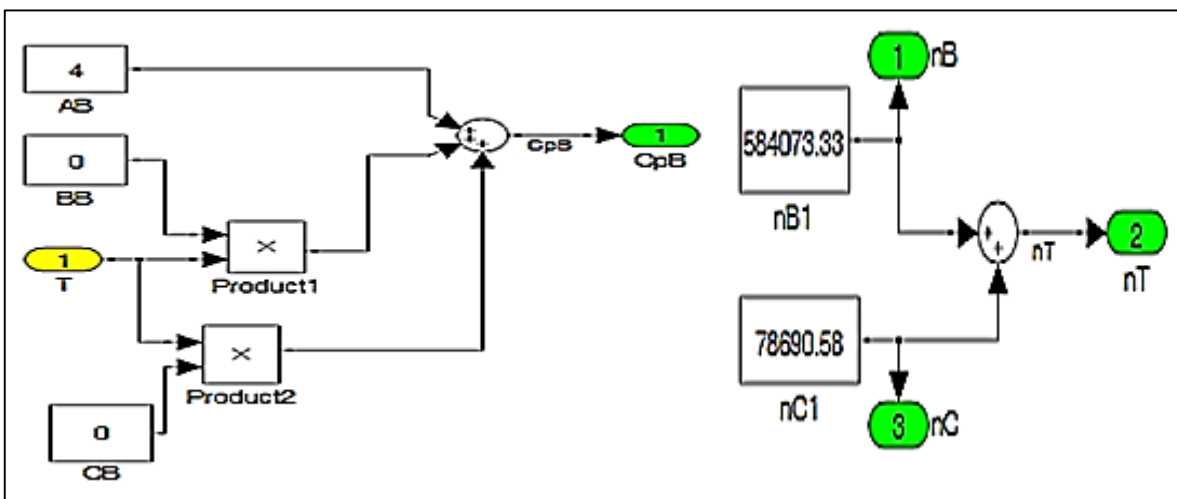
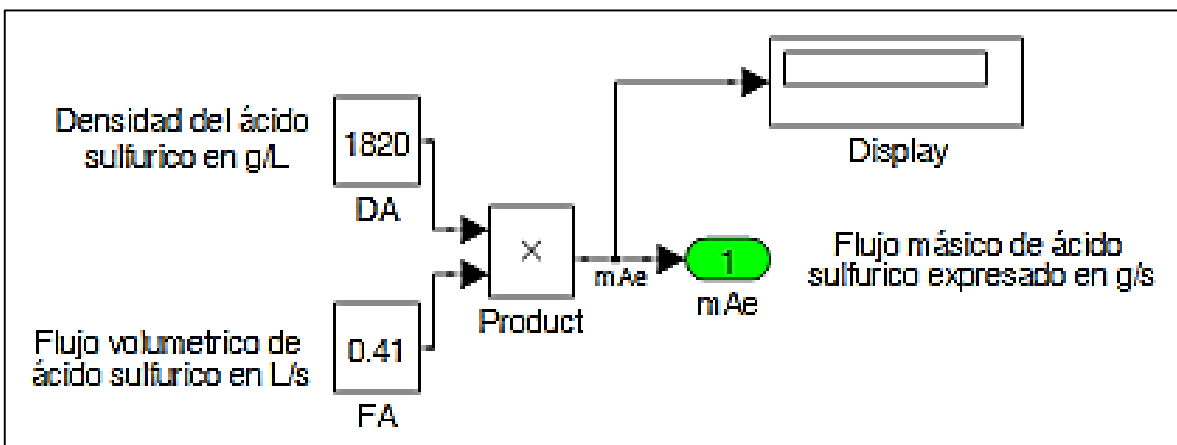
8.- Certificación: Se certifica calidad a cada despacho (Cenizas, humedad, Poder Calorífico y Granulometría).

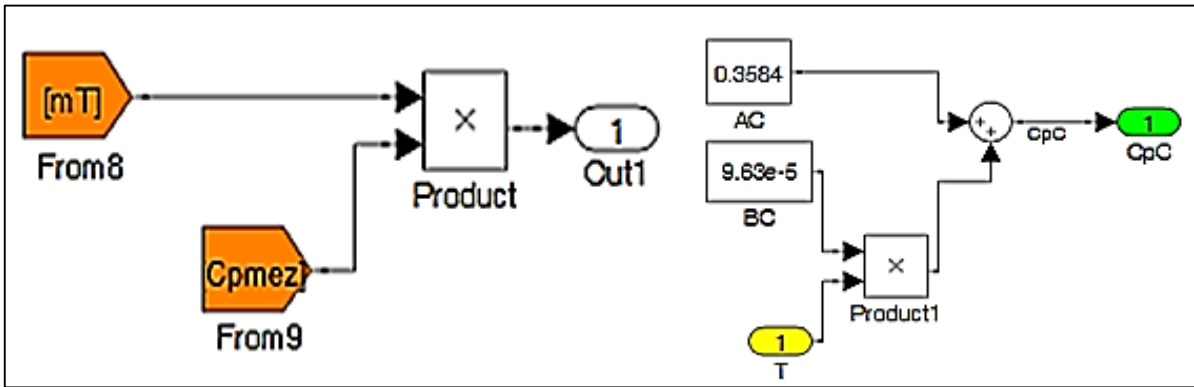
9.- Embalaje: A granel.

### Anexo C. Esquema programación etapa 1

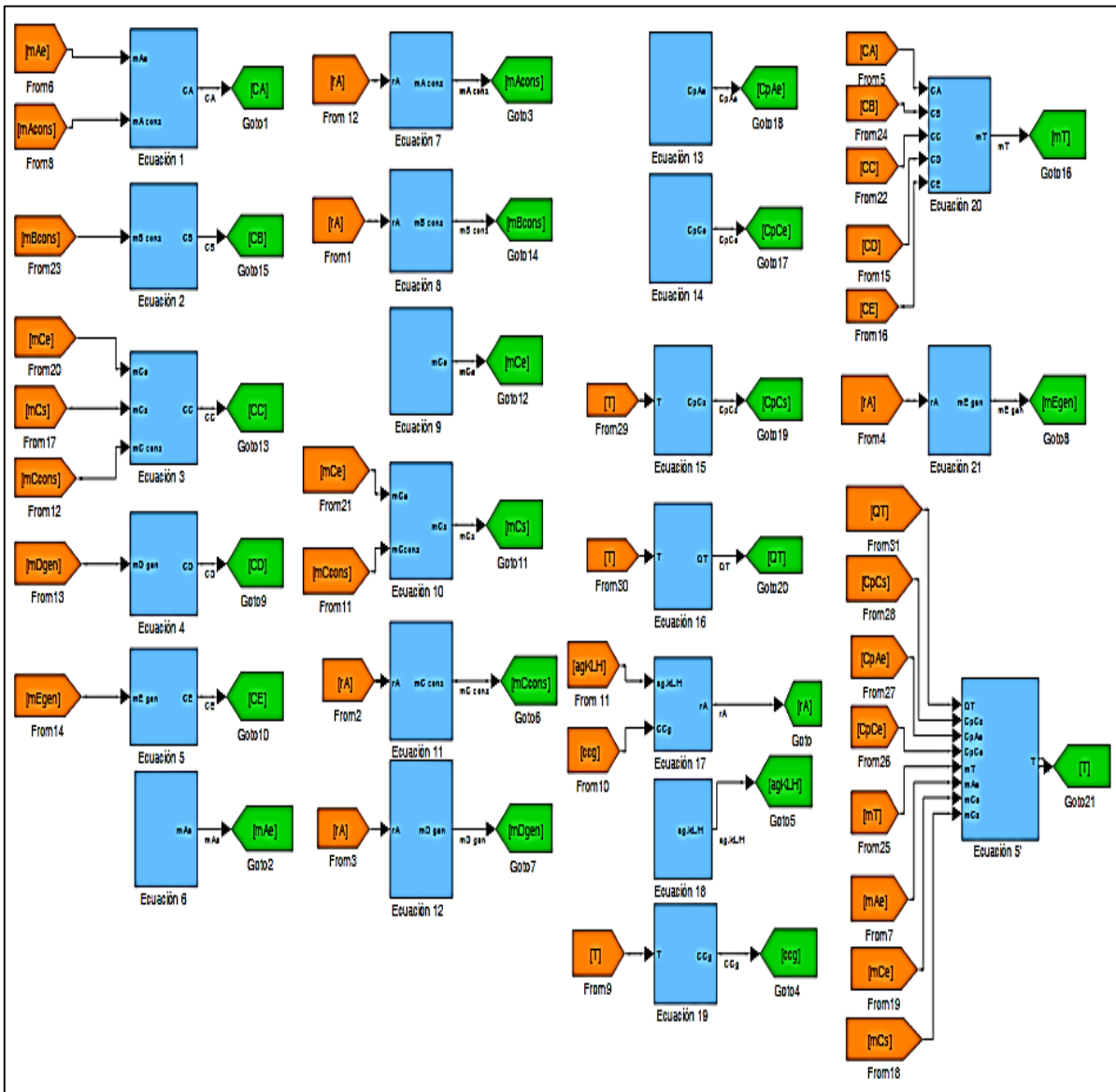


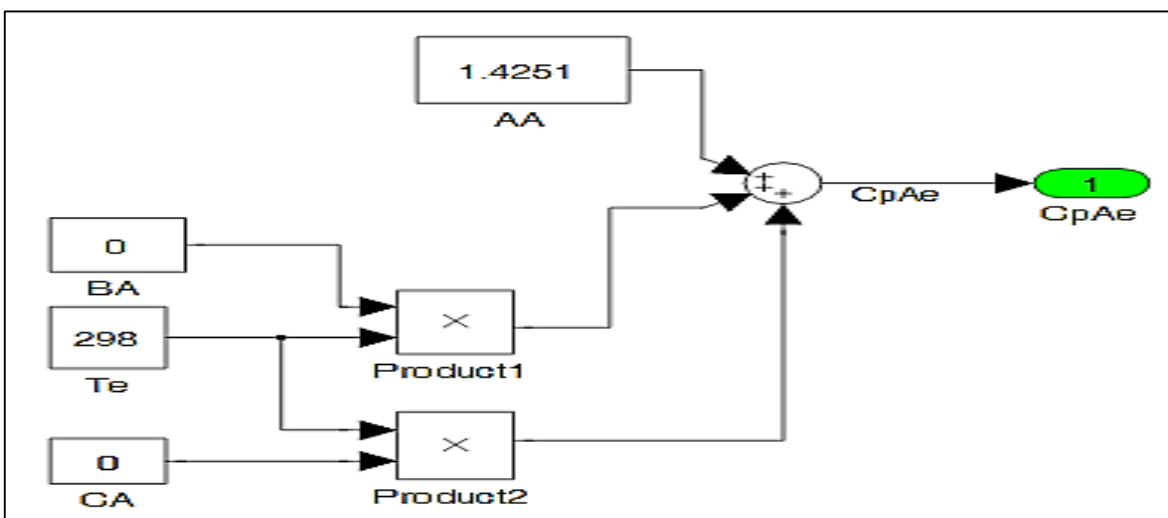
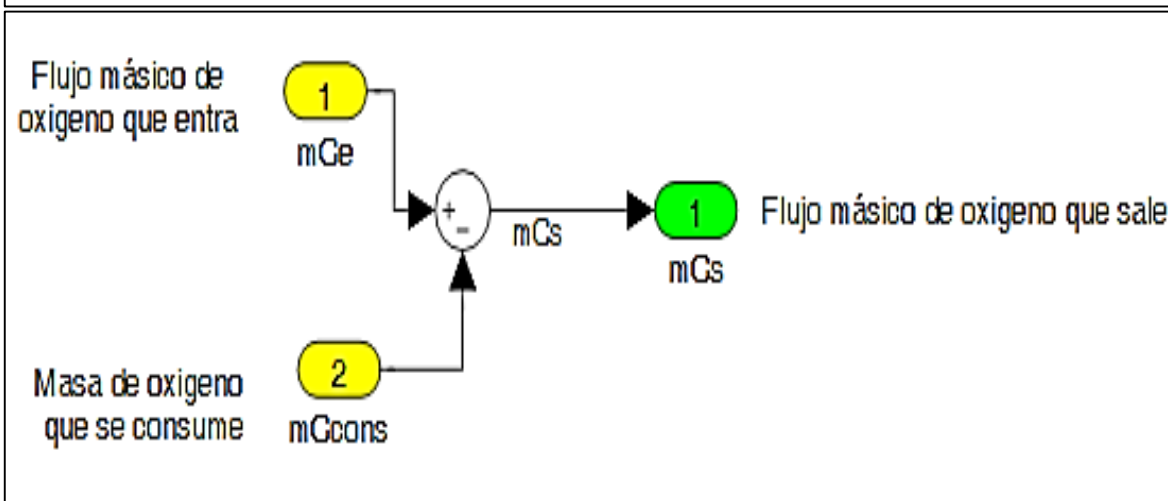
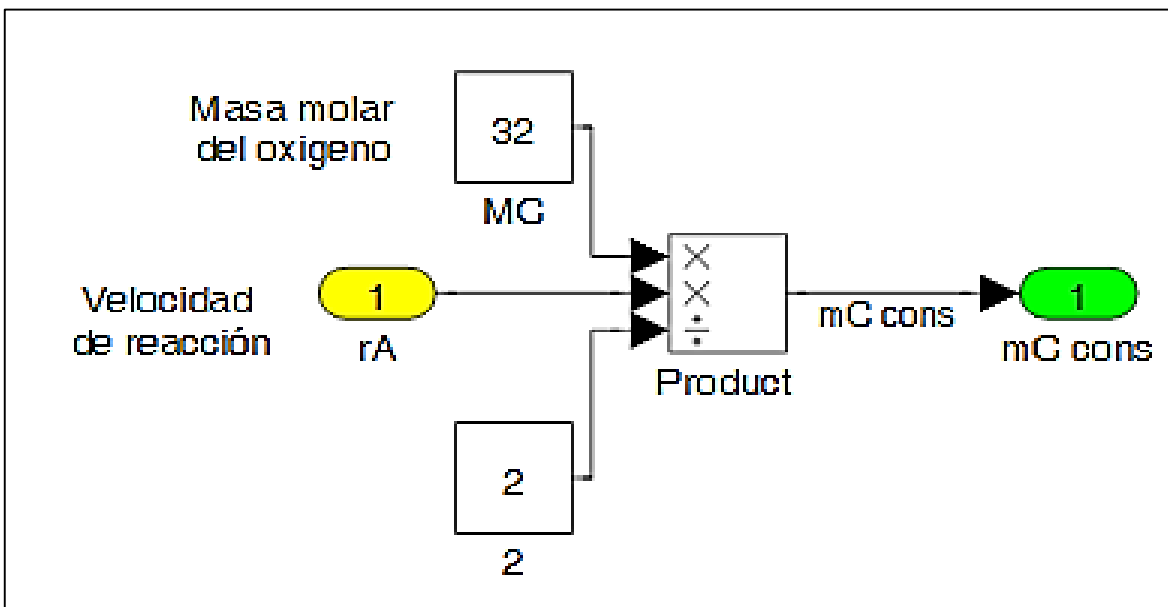


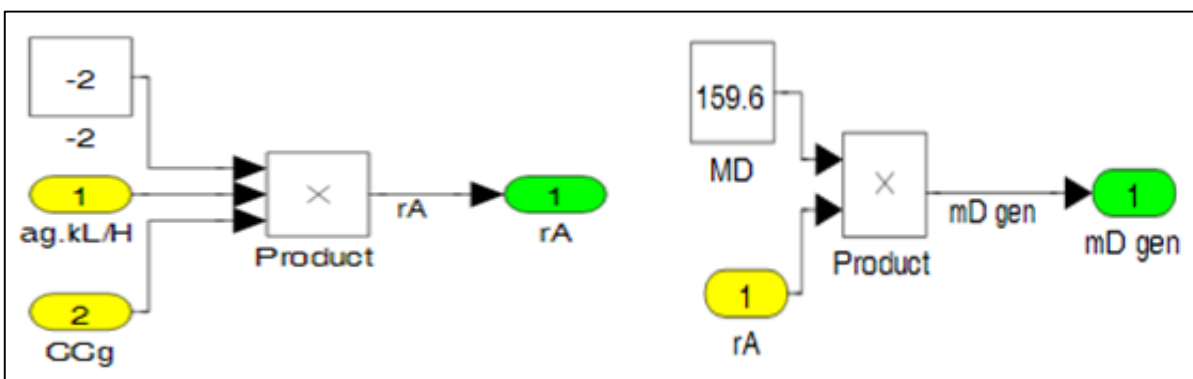
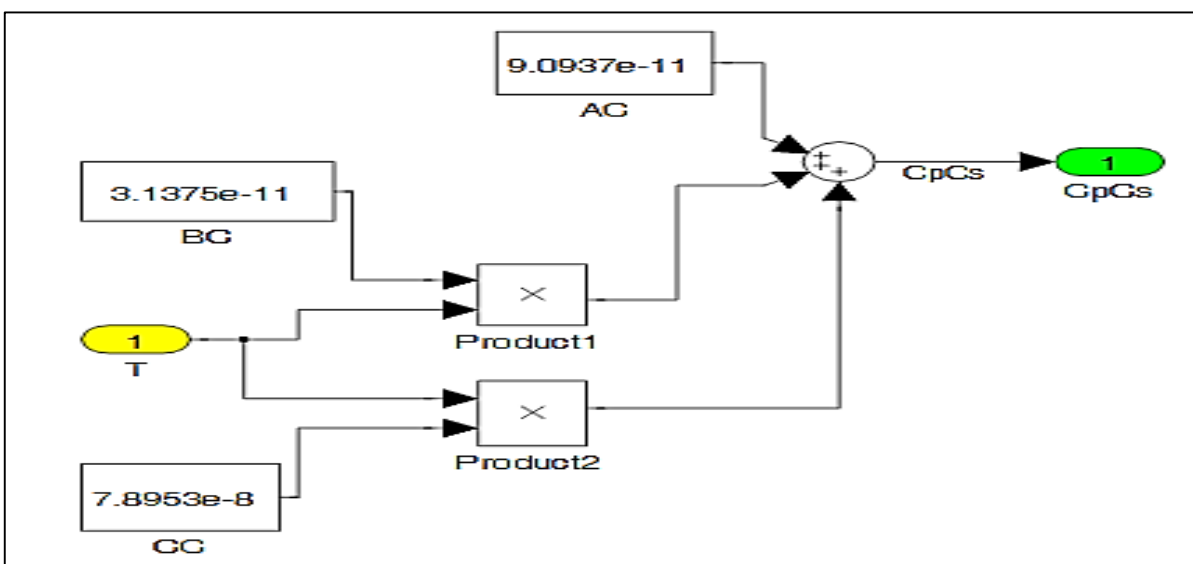
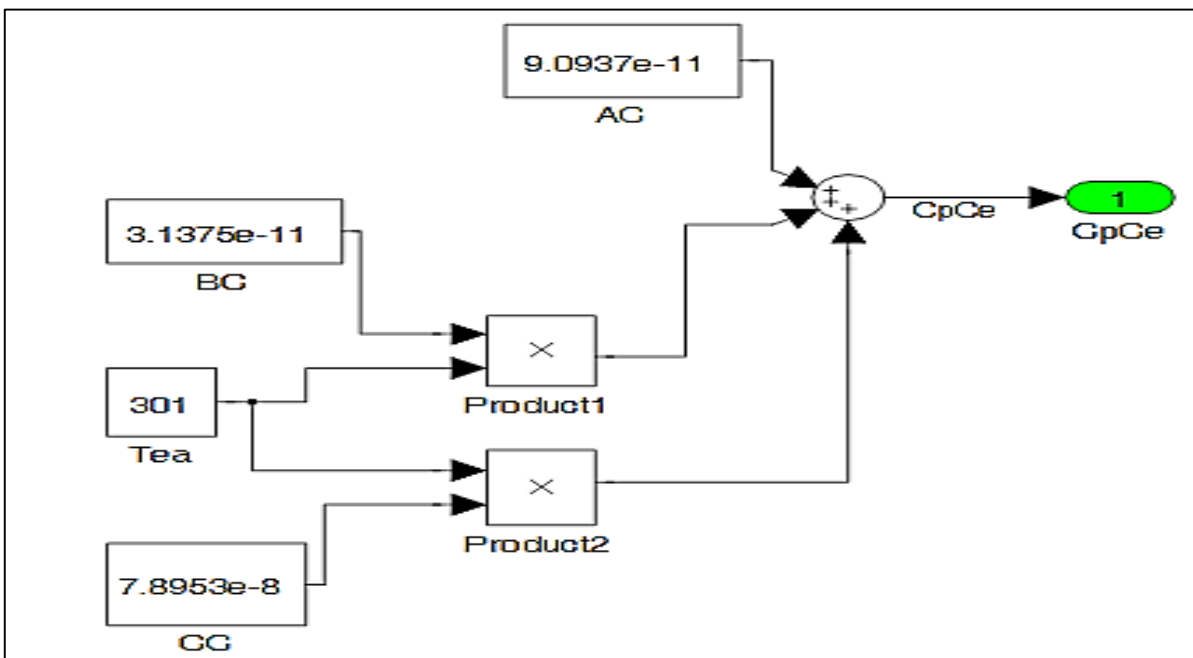




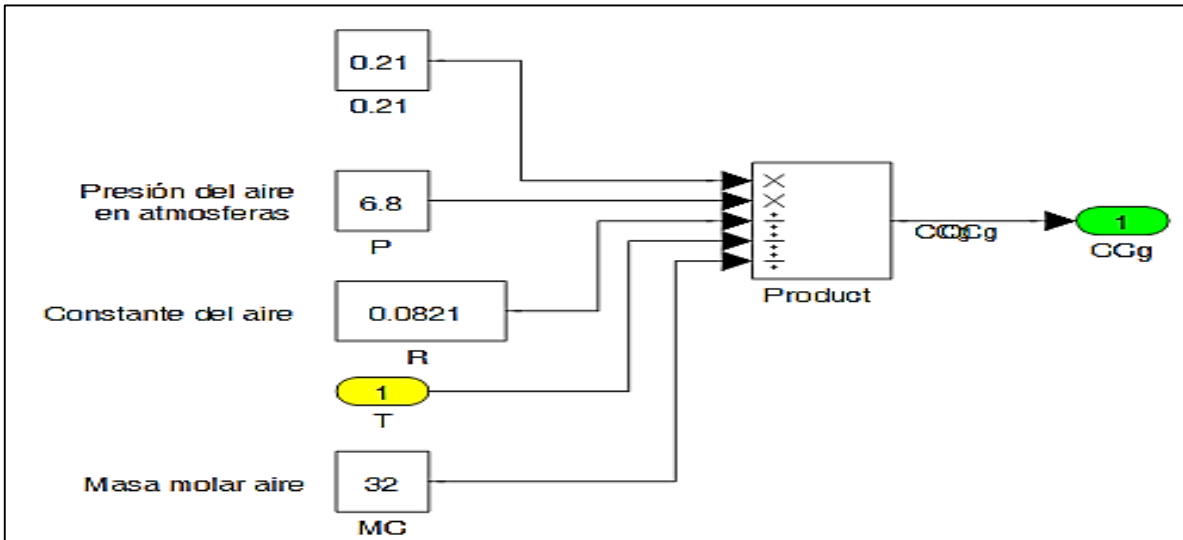
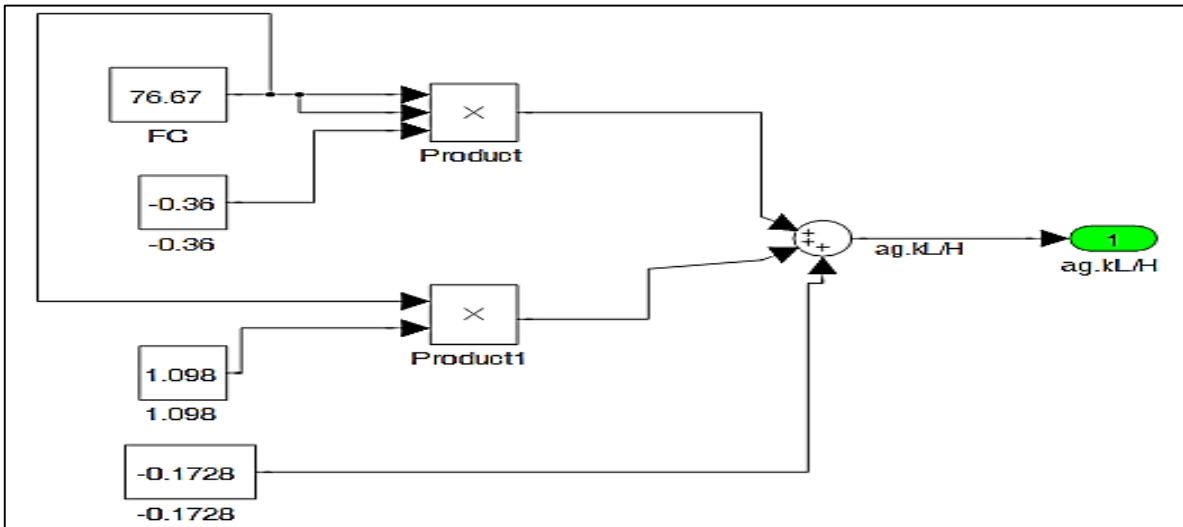
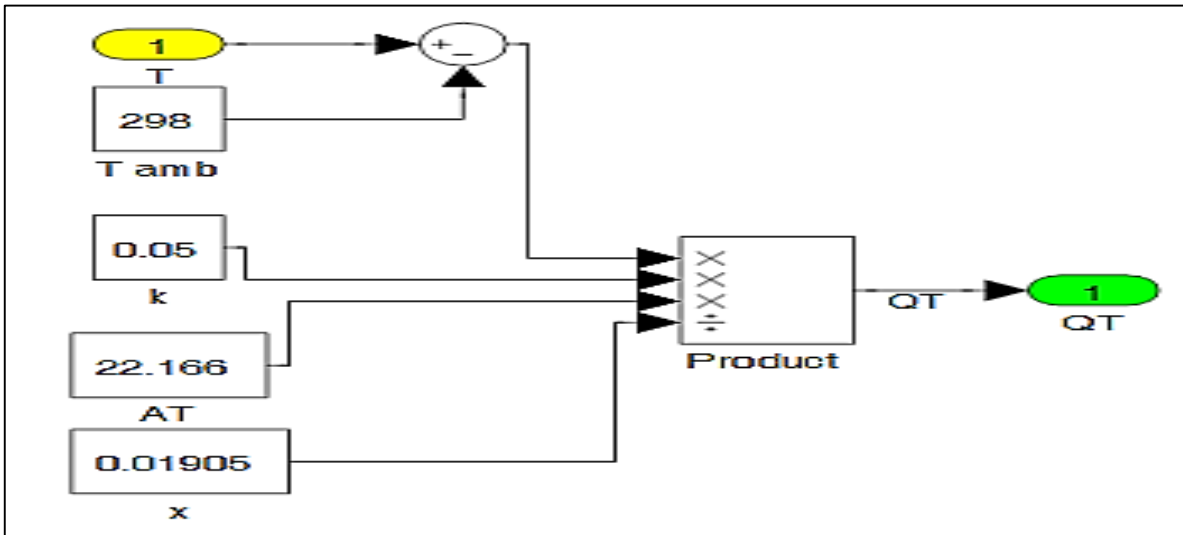
### Anexo D. Esquema programación etapa 2

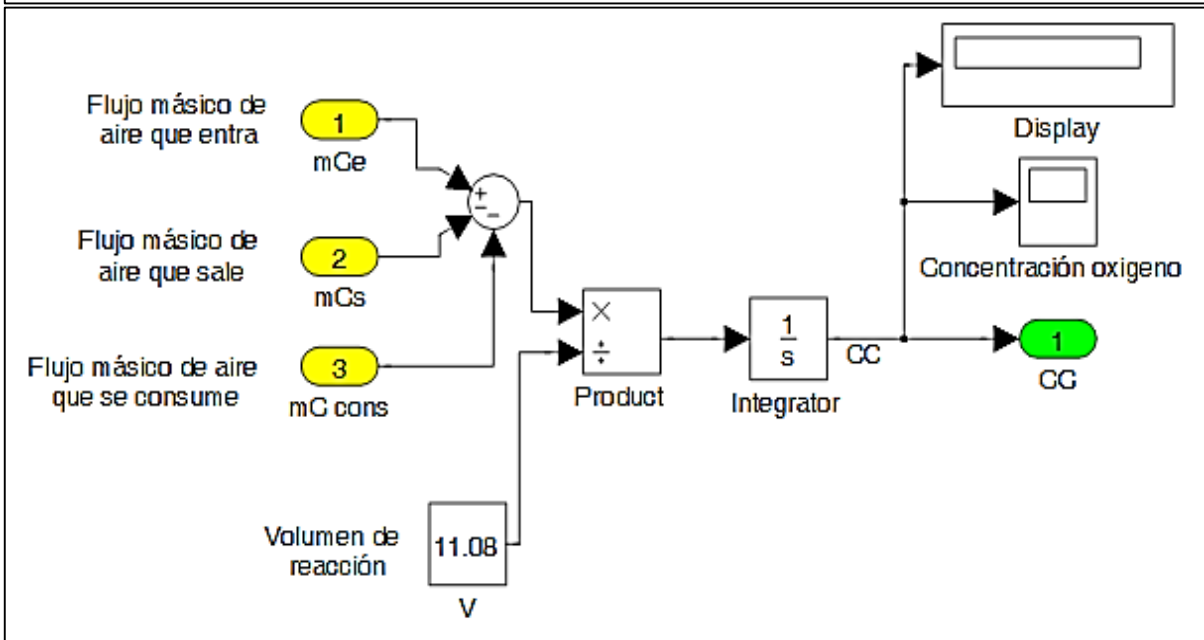
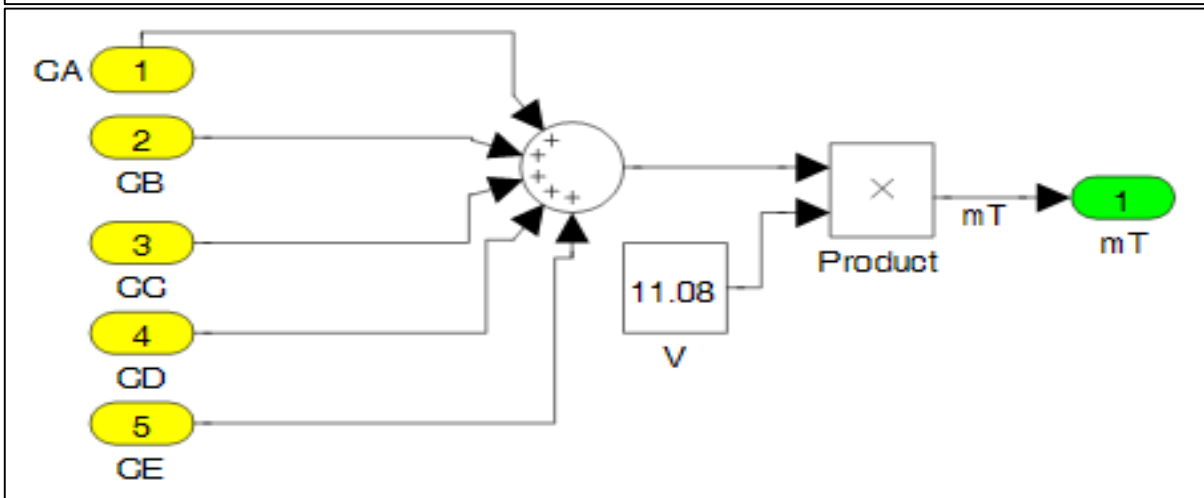
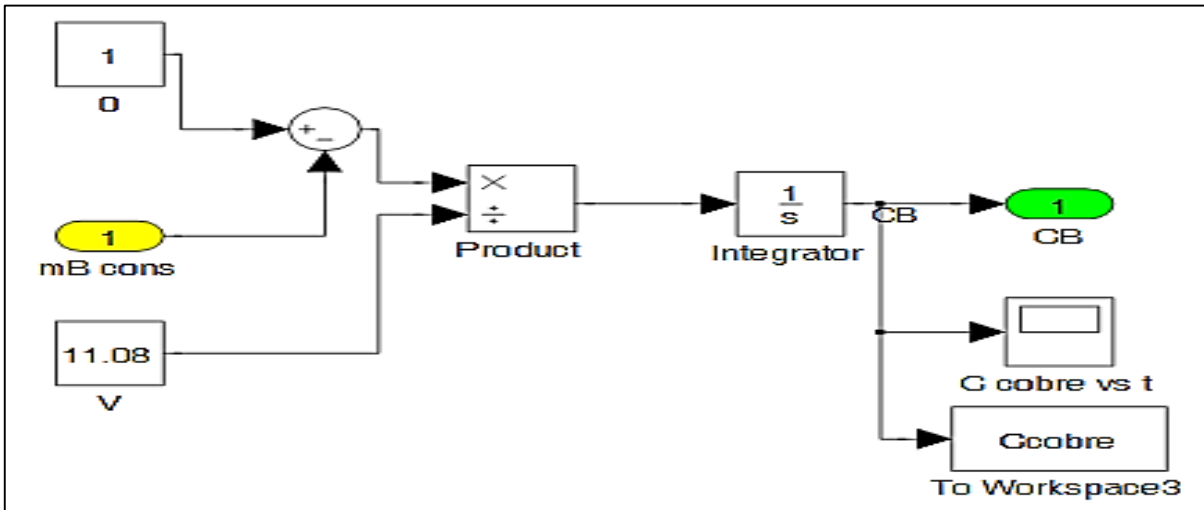


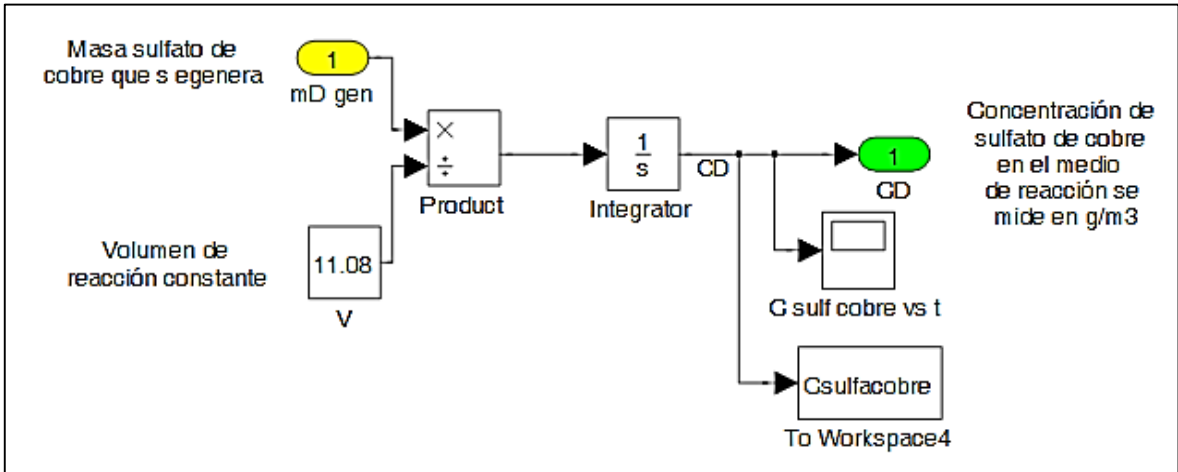
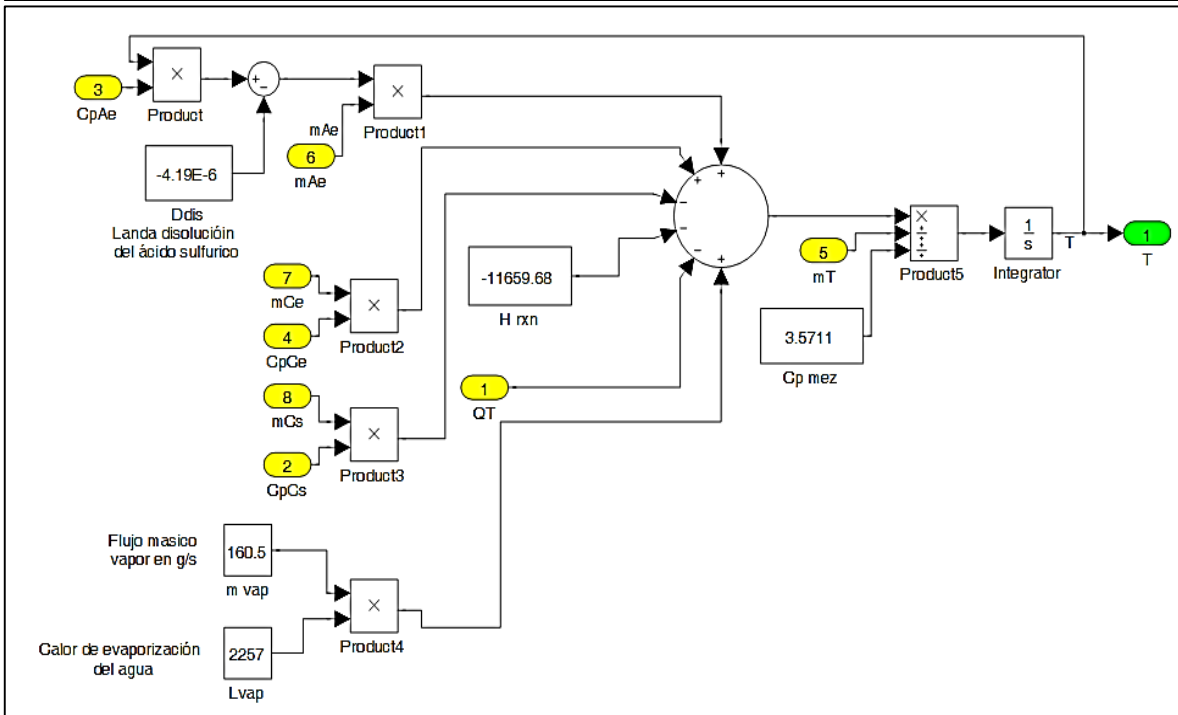
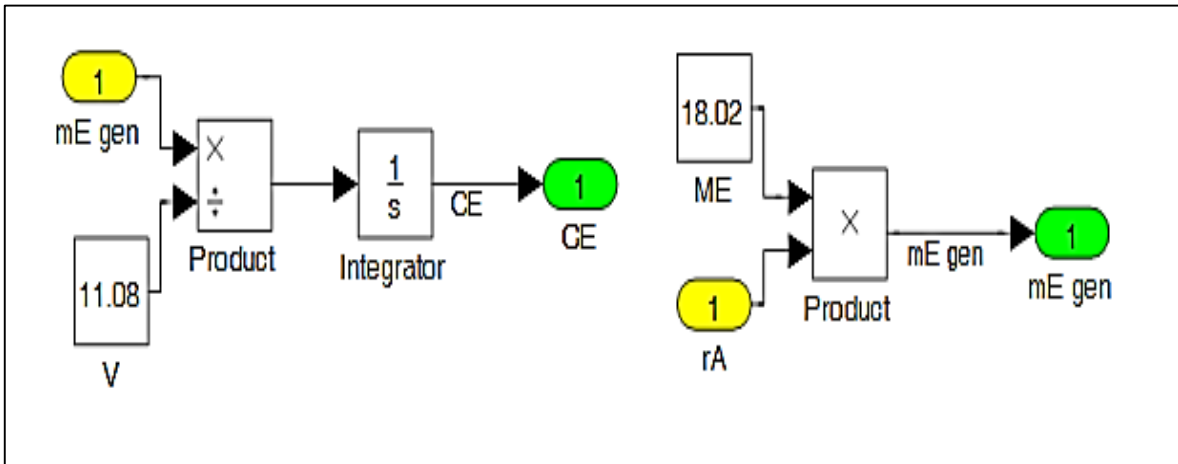


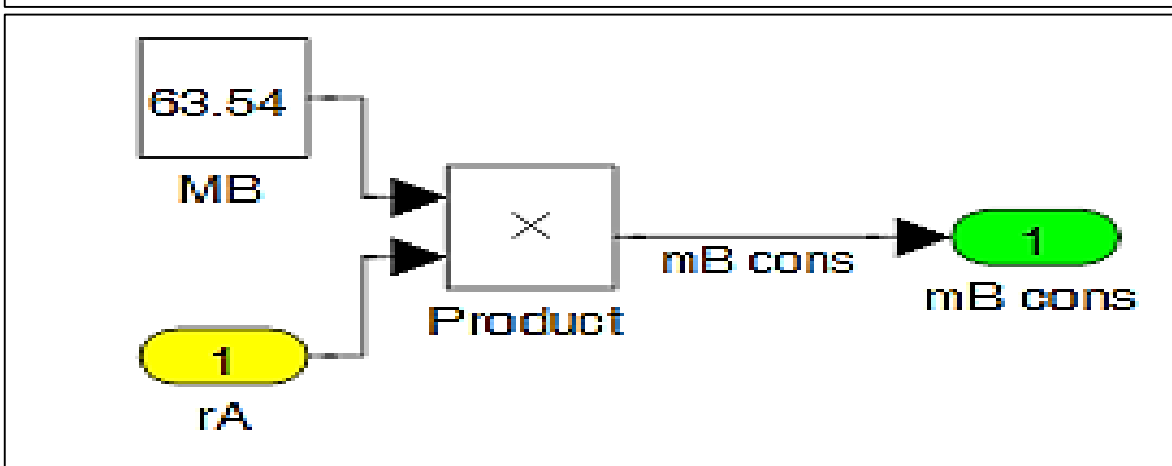
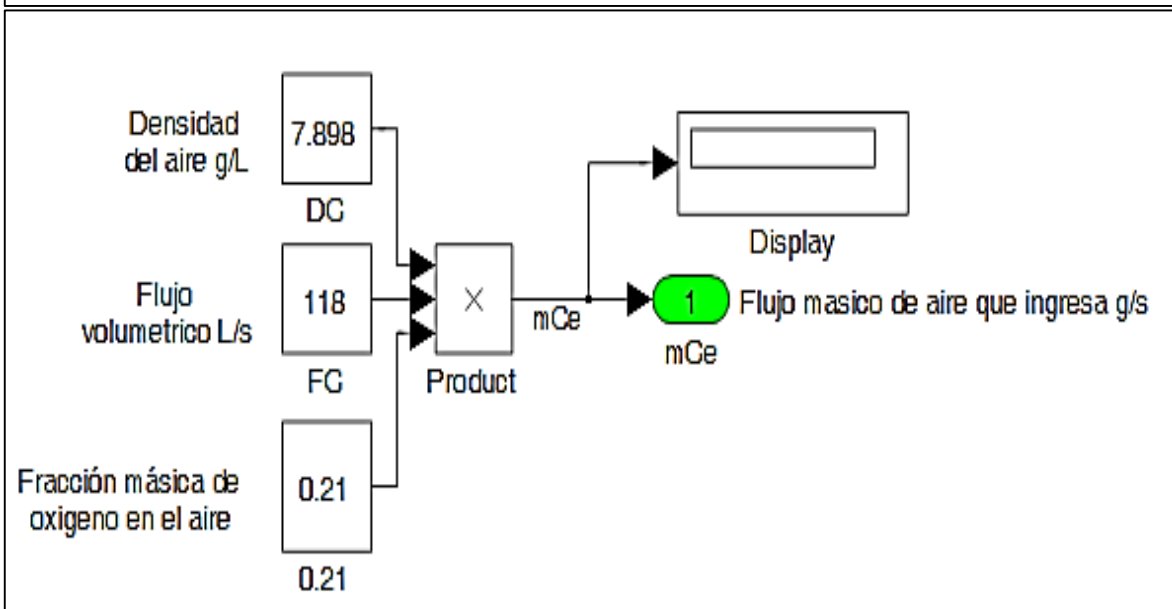
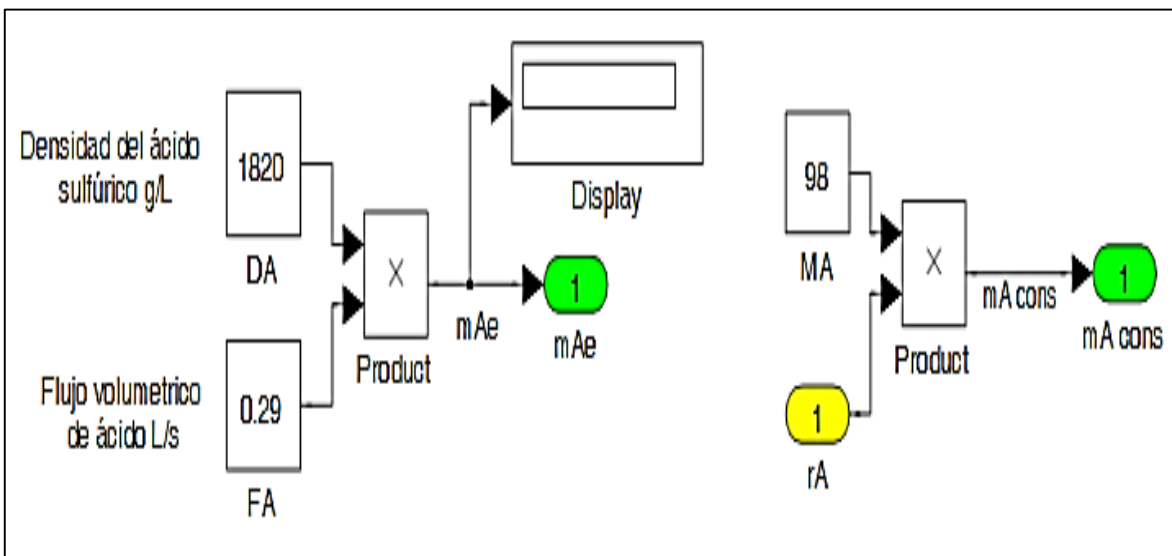




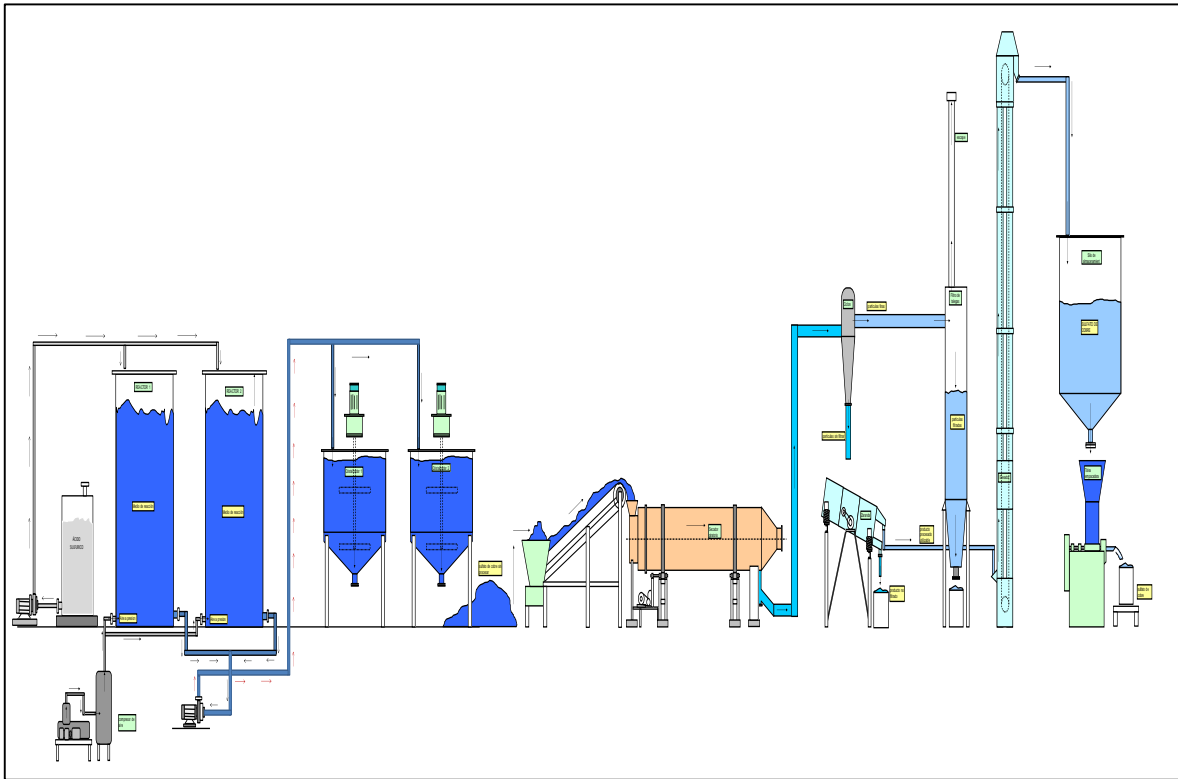






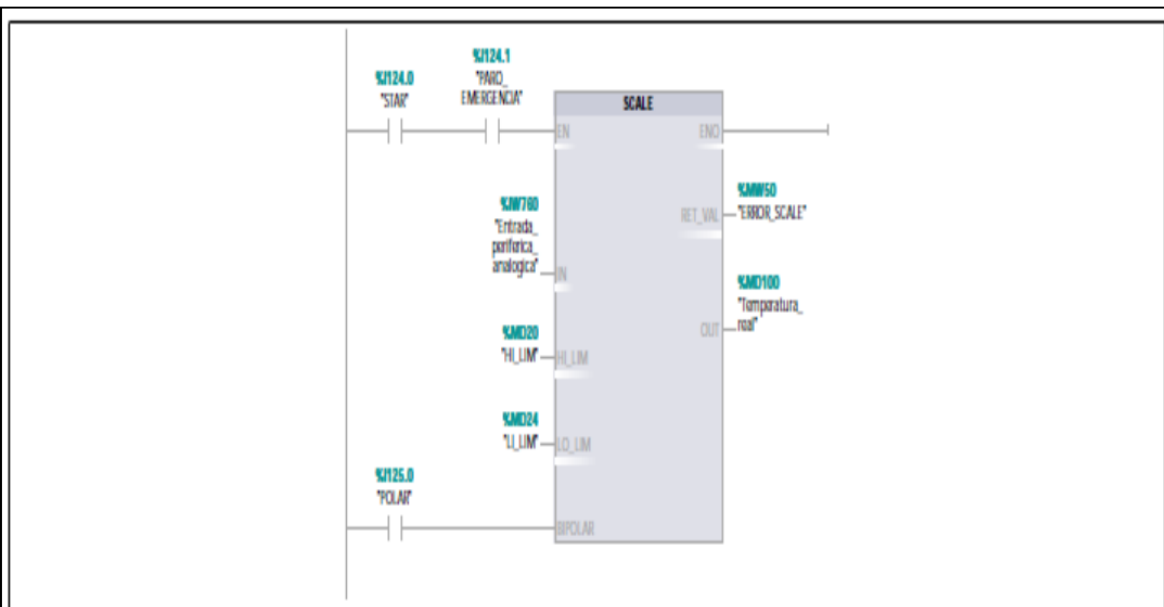


### Anexo E. Diagrama de flujo planta sulfato de cobre



### Anexo F. Sistema control de temperatura

|  |                              |                         |                      |   |     |
|--|------------------------------|-------------------------|----------------------|---|-----|
| Totally Integrated Automation Portal                                     |                              |                         |                      |   |     |
| <b>control_temperatura / PLC_1 [CPU 314C-2 DP] / Bloques de programa</b> |                              |                         |                      |   |     |
| <b>Main [OB1]</b>  |                              |                         |                      |   |     |
| <b>Main Propiedades</b>  |                              |                         |                      |   |     |
| <b>General</b>   |                              |                         |                      |   |     |
| <b>Nombre</b>  | Main                         | <b>Número</b>           | 1                    | <b>Tipo</b>   | OB  |
| <b>Numeración</b>  | automática                   |                         |                      | <b>Idioma</b>   | KOP |
| <b>Información</b>   |                              |                         |                      |   |     |
| <b>Título</b>  | "Main Program Sweep (Cycle)" | <b>Autor</b>            |                      | <b>Comentario</b>   |     |
| <b>Versión</b>   | 0.1                          | <b>ID personalizada</b> |                      | <b>Familia</b>  |     |
| <b>Main</b>  |                              |                         |                      |   |     |
| <b>Nombre</b>  | <b>Tipo de datos</b>         | <b>Offset</b>           | <b>Valor predet.</b> | <b>Comentario</b>   |     |
| ▼ Temp   |                              |                         |                      |   |     |
| OB1_EV_CLASS   | Byte                         | 0.0                     |                      | Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1) |     |
| OB1_SCAN_1   | Byte                         | 1.0                     |                      | 1 (Cold restart scan 1 of OB1), 3 (Scan 2-n of OB1)       |     |
| OB1_PRIORITY   | Byte                         | 2.0                     |                      | Priority of OB Execution                                  |     |
| OB1_OB_NUMBR   | Byte                         | 3.0                     |                      | 1 (Organization block 1, OB1)                             |     |
| OB1_RESERVED_1   | Byte                         | 4.0                     |                      | Reserved for system                                       |     |
| OB1_RESERVED_2   | Byte                         | 5.0                     |                      | Reserved for system                                       |     |
| OB1_PREV_CYCLE   | Int                          | 6.0                     |                      | Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)            |     |
| OB1_MIN_CYCLE  | Int                          | 8.0                     |                      | Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)                  |     |
| OB1_MAX_CYCLE  | Int                          | 10.0                    |                      | Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)                  |     |
| OB1_DATE_TIME  | Date_And_Time                | 12.0                    |                      | Date and time OB1 started                                 |     |
| Constant   |                              |                         |                      |   |     |
| <b>Segmento 1: escalización de la señal analógica de entrada</b>         |                              |                         |                      |   |     |



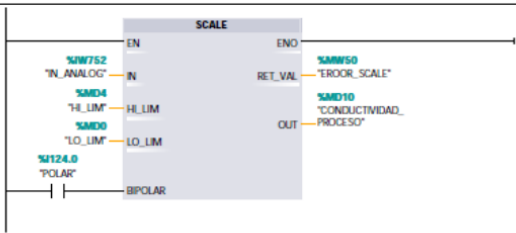
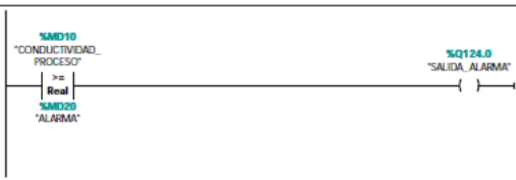
| Simbolo                        | Dirección | Tipo | Comentario           |
|--------------------------------|-----------|------|----------------------|
| "Entrada_periferica_analogica" | %IW760    | Int  | Entrada_analg_Pt-100 |
| "ERROR_SCALE"                  | %MW50     | Word |                      |
| "HI_LIM"                       | %MD20     | Real |                      |
| "LI_LIM"                       | %MD24     | Real |                      |
| "PARO_EMERGENCIA"              | %I124.1   | Bool |                      |
| "POLAR"                        | %I125.0   | Bool |                      |
| "STAR"                         | %I124.0   | Bool |                      |
| "Temperatura_real"             | %MD100    | Real |                      |

Segmento 2:



| Simbolo            | Dirección | Tipo | Comentario |
|--------------------|-----------|------|------------|
| "Salida_calentar"  | %Q125.0   | Bool |            |
| "Set_point"        | %MD28     | Real |            |
| "Temperatura_real" | %MD100    | Real |            |

### Anexo G. Sistema control conductividad eléctrica

|  |                              |                         |
|--|------------------------------|-------------------------|
| Totally Integrated Automation Portal   |                              |                         |
| <b>Analisis_conductividad / PLC_1 [CPU 314C-2 DP] / Bloques de programa</b>          |                              |                         |
| <b>Main [OB1]</b>  |                              |                         |
| <b>Main Propiedades</b>  |                              |                         |
| <b>General</b>   |                              |                         |
| <b>Nombre</b>  | Main                         | <b>Numero</b> 1         |
| <b>Numeración</b>  | automática                   | <b>Tipo</b> OB          |
| <b>Idioma</b>  | KOP                          |                         |
| <b>Información</b>   |                              |                         |
| <b>Título</b>  | "Main Program Sweep (Cycle)" | <b>Autor</b>            |
| <b>Versión</b>   | 0.1                          | <b>ID personalizada</b> |
| <b>Comentario</b>  |                              |                         |
| <b>Familia</b>   |                              |                         |
| <b>Main</b>  |                              |                         |
| <b>Nombre</b>  | <b>Tipo de datos</b>         | <b>Offset</b>           |
| <b>Valor predet.</b>   | <b>Comentario</b>            |                         |
| ▼ Temp   |                              |                         |
| OB1_EV_CLASS   | Byte                         | 0.0                     |
| OB1_SCAN_1   | Byte                         | 1.0                     |
| OB1_PRIORITY   | Byte                         | 2.0                     |
| OB1_OB_NUMBR   | Byte                         | 3.0                     |
| OB1_RESERVED_1   | Byte                         | 4.0                     |
| OB1_RESERVED_2   | Byte                         | 5.0                     |
| OB1_PREV_CYCLE   | Int                          | 6.0                     |
| OB1_MIN_CYCLE  | Int                          | 8.0                     |
| OB1_MAX_CYCLE  | Int                          | 10.0                    |
| OB1_DATE_TIME  | Date_And_Time                | 12.0                    |
| Constant   |                              |                         |
| <b>Segmento 1:</b>   |                              |                         |
|  |                              |                         |
| <b>Símbolo</b>   | <b>Dirección</b>             | <b>Tipo</b>             |
| "CONDUCTIVIDAD_PROCESO"  | %MD10                        | Real                    |
| "ERROR_SCALE"  | %MW50                        | Word                    |
| "HI_LIM"   | %MD4                         | Real                    |
| "IN_ANALOG"  | %IW752                       | Int                     |
| "LO_LIM"   | %MD0                         | Real                    |
| "POLAR"  | %I124.0                      | Bool                    |
| <b>Segmento 2:</b>   |                              |                         |
|  |                              |                         |
| <b>Símbolo</b>   | <b>Dirección</b>             | <b>Tipo</b>             |
| "ALARMA"   | %MD20                        | Real                    |
| "CONDUCTIVIDAD_PROCESO"  | %MD10                        | Real                    |
| "SALIDA_ALARMA"  | %Q124.0                      | Bool                    |

|   |  |         |            |
|---|--|---------|------------|
|  | <b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b> | Código  | FDE 089    |
|   |  | Versión | 03         |
|   |  | Fecha   | 2015-01-22 |

FIRMA ESTUDIANTES Haiwei Andree Hines Pié Mejía

FIRMA ASESOR 

FECHA ENTREGA: 25/02/2016

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_\_      ACEPTADO \_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_