



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS
CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA APLICACIÓN
EN BALANCES DE MASA Y ENERGIA EN EL HORNO ROTATIVO DE LA
PLANTA GUAPÁN -UCEM”

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

PRESENTADO POR:

ZHINDÓN MARTINEZ PEDRO DAVID

DIRECTOR DE TESIS:

ING. VICTOR FERNANDO LLORET ORELLANA

CUENCA – ECUADOR

18 DE ABRIL DEL 2015



RESUMEN

El objetivo de este trabajo es promover en el personal técnico del área de Producción de la Planta de cemento Guapán de la Unión Cementera Nacional la realización periódica o permanente de balances de masa y energía en el sistema Pre-calentador-horno- enfriador, contando con la ayuda de una herramienta informática que ha sido desarrollada en Matlab[®] para facilitar el cálculo y obtención de resultados de los balances térmicos que siempre se deben realizar en el horno-reactor rotativo de clinker a fin de evaluar su funcionamiento y eficiencia operativa.

Primero, se describe el marco teórico conceptual del proceso de fabricación de clinker, componente base del cemento, luego se detalla la metodología a seguir para efectuar las mediciones, obtener los datos de campo y control central de las variables y parámetros de operación del sistema precalentador - horno rotativo – enfriador y finalmente se explica la forma de realizar los cálculos y los resultados que se obtienen con la ayuda del uso de la herramienta informática desarrollada.

Este trabajo intenta detallar de manera simple y entendible las corrientes de entrada y salida de masa y energía que existen en el sistema del horno rotativo, se aplica una notación estándar que puede aplicar el personal operativo de la Planta Guapán para el registro y comprensión de todos los datos de entrada y salida que intervienen en la realización práctica del balance energético y también explica las formas de cálculo para la determinación de las variables no conocidas.

Una vez determinada la manera de obtener los datos y los cálculos a los que estos serán sometidos, se procedió a desarrollar la herramienta informática, en la que se introducen los datos de entrada para que el programa realice los cálculos, este programa también cuenta con una función que permite realizar la gráfica del diagrama de Sankey, que resume e interpreta los resultados del balance, así mismo, el programa es capaz de almacenar los resultados obtenidos cuantas veces se realice el balance y se constituyan en una base de referencia y tendencia histórica de la eficiencia energética con la que ha operado la planta.

Finalizado el balance, se deben registrar las observaciones que se crean pertinentes con respecto a interpretar sus resultados, para establecer las recomendaciones pertinentes y se intente la mejora continua en las instalaciones y la manera óptima de operar el conjunto del sistema para conseguir el propósito final de mejorar el rendimiento productivo del horno y de hacer el uso más eficiente posible de la energía térmica que consume el proceso, es decir, producir la mayor cantidad de clinker con el menor consumo posible de combustible medido en kilocalorías de combustible por kilogramos de clinker producido.



ABSTRACT

The objective of this work is to promote to the technical personal of the area of Production of the plant of cement Guapán of the “Unión Cementera Nacional”, the realization of periodic or permanent balances of mass and energy on the Pre-heater-kiln – cooler system, counting with the help of an informatics tool that has been developed in Matlab to make the calculus easier and the obtaining of results for the heat balances, that should always be done on the kiln-reactor of clinker to evaluate its performance and operative efficiency.

First, it's described the conceptual theoretical framework of the process of kiln production manufacturing, base component of the kiln, and then the methodology to follow to take the measurements, obtaining the field data and central control of the variables and operation parameters of the pre-heater-rotative kiln-cooler system and finally it is explained how to make the calculus and the obtained results with the help of the developed informatics tool.

This work attempts to detail simply and understandable the inflows and outflows of mass and energy that exist in the rotative kiln system, it is applied a standard notation that the operative personal of the plant Guapán can apply for the register and the comprehension of every input and output that intervene in the practical realization of the energy balance and also explains how to calculate the determination of not known variables.

Once determinated how to obtain the data and calculus, which they are going to be submitted, we proceeded to develop an informatics tool, in which the inputs are introduced for the program to make the calculus, this program also counts with a function that allows to make a Sankey graphic, that resumes and interprets the results of the balance, as well as the program is able to store the results obtained as many times as the balance is done and those will be a reference base and a historical tendency of the energetic efficiency with which the plant has operated.

When the balance is over, the necessary observations should be registered with respect to the interpretation of results, to establish the pertinent recommendations and try the continuous improve in the installations and the optimal way to operate the system to get the final purpose of improving the productive yield of the kiln and to have a more efficient use of thermal energy that the process consumes, this is to say, to produce as much clinker with the lowest consume of fuel, measured in kcal of fuel per kg of clinker produced.



INDICE DE CONTENIDOS

1. Capítulo: Marco teórico.....	2
1.1. Definición de cemento y cemento portland.....	2
1.2. Materias primas.....	2
1.3. Proceso de fabricación del cemento	3
1.3.1. Obtención y preparación de las materias primas.....	3
1.3.2. Molienda y cocción de las materias primas.....	4
1.3.3. Proceso de fabricación del Clinker.....	5
1.3.3.1. Vía seca.....	6
1.3.3.2. Vía húmeda.....	6
1.3.3.3. Vía semi-húmeda y semi-seca.....	6
1.3.4. Molienda de cemento o de acabado.....	6
1.4. Módulos.....	7
1.5. Transformaciones del crudo con la temperatura.....	8
1.5.1. Energía requerida para el proceso de fabricación del Clinker.....	11
1.5.2. Cinética de la cocción.....	11
1.6. Fórmulas de Bogue.....	13
1.6.1. Características de los componentes del Clinker.....	14
1.7. Métodos térmicos para el diagnóstico energético de las instalaciones industriales.....	15
1.8. Balance de masa y energía en los hornos rotativos.....	18
1.9. Diagrama de Sankey.....	21
1.10. Proceso de clinkerización en la planta Guapán: sistema Pre-calentador-horno- enfriador.....	22
1.11. Herramientas informáticas y su importancia.....	25
2. Capítulo: Metodología a seguir para la realización del balance de masa y energía.....	26
2.1. Determinación de los flujos de masa.....	26
2.1.1. Corrientes másicas de entrada al sistema.....	27
2.1.2. Corrientes másicas de salida del sistema.....	28
2.2. Determinación de los flujos de energía.....	30
2.2.1. Corrientes calóricas de entrada al sistema.....	31
2.2.2. Corrientes calóricas de salida del sistema.....	32
2.3. Toma de datos.....	33
2.4. Equipos a utilizar.....	45
2.5. Cálculos de los balances de masa.....	49
2.6. Cálculos de los balances de energía.....	60
2.7. Método para la programación informática.....	72



3. Capítulo: Resultados obtenidos.....	75
3.1. Poder calorífico del combustible fuel oil #6 utilizado en la planta.....	75
3.2. Cálculo de áreas.....	77
3.2.1. Área de las paredes del horno.....	77
3.2.2. Área de las paredes de las etapas del pre-calentador.....	77
3.2.3. Área de las paredes de las etapas de los ductos del pre-calentador.....	78
3.2.4. Área de las paredes del enfriador.....	78
3.2.5. Áreas transversales de la chimenea F27 y downcomer.....	79
3.3. Cálculo de los diámetros.....	79
3.4. Valores obtenidos en la planta antes de los días de muestreo.....	80
3.5. Tablas resumen de los datos obtenidos en la empresa.....	85
3.6. Cálculo de los módulos.....	89
3.7. Cálculo de la composición potencial de Clinker.....	89
3.8. Cálculo del balance de masa.....	89
3.9. Cálculo del balance de energía.....	94
3.10. Validación de datos.....	97
3.11. Rendimiento térmico del sistema.....	102
3.12. Rendimiento térmico del enfriador.....	103
4. Capítulo: Herramienta informática.....	105
4.1. Glosario de variables dentro de la herramienta.....	105
4.2. Programación y descripción de la herramienta.....	105
4.2.1. Descripción de los botones de la primera ventana: “Presentacion”.....	105
4.2.2. Descripción de los botones de la ventana: “crudo”.....	106
4.2.3. Descripción de los botones de la ventana: “clinker”.....	108
4.2.4. Descripción de los botones de la ventana: “balmc”.....	109
4.2.5. Descripción de los botones de la ventana: “ventana1”.....	111
4.2.6. Descripción de los botones de la ventana: “diagrama_de_sankey”.....	112
4.3. Función de Guardar y Cargar en el programa.....	114
4.4. Diagrama de Sankey.....	115
4.5. Resultados obtenidos por el programa.....	116
5. Capítulo: Análisis de datos y resultados.....	122
6. Capítulo: Conclusiones y recomendaciones.....	126
6.1. Conclusiones.....	126
6.2. Recomendaciones.....	128
Bibliografía.....	129
Anexos.....	132



CLAUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

Pedro David Zhindón Martínez, autor de la tesis “Desarrollo de un herramienta informática para aplicación en balances de masa y energía en el horno rotativo de la planta Guapán - UCEM” reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniería Química. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 15 de abril del 2015

Pedro David Zhindón Martínez



CLAUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Pedro David Zhindón Martínez, autor de la tesis “Desarrollo de un herramienta informática para aplicación en balances de masa y energía en el horno rotativo de la planta Guapán - UCEM”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de abril del 2015

Pedro David Zhindón Martínez

C.I: 0105020481



Agradecimiento

Un agradecimiento al personal de los departamentos de Investigación y Desarrollo, de Producción y de Mantenimiento preventivo de la planta Guapán-UCEM y a todos los docentes de la facultad de Ciencias Químicas y de la escuela de Ingeniería Química, que ayudaron en mi formación para ingeniero químico.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Fernando Lloret, quien me facilitó el ingreso a esta empresa y al Ingeniero Alfredo Mora, quien me ayudó en todo lo posible para la realización de este trabajo.



Dedicatoria

El trabajo presentado está dedicado a todas aquellas personas que me apoyaron durante este proceso educativo: familiares, amigos y compañeros, quienes nunca dejaron de brindarme su comprensión y ayuda.





1. Marco teórico

1.1. Definición de cemento y cemento portland

La definición de cemento proporcionada por www.definicionabc.com es:

“El cemento es un material que resulta de la combinación de arcilla molida con materiales calcáreos de polvo, en tanto, una vez que entran en contacto con el agua se solidifica y vuelve duro.”¹

Dentro de los cementos el más usado para formar el hormigón o concreto es el cemento Portland, el cual se obtiene al moler Clinker con 3 a 5% de yeso

“El cemento Portland es un ligante hidráulico inorgánico, polifásico artificial, que se obtiene a partir de un producto intermedio denominado Clinker, el cual se produce mediante la cocción a, aproximadamente, 1480 °C, generalmente en hornos rotatorios, de una mezcla en proporciones preestablecidas de carbonato de calcio (caliza) y de un aluminosilicato (arcillas o margas) u otros materiales de una composición global similar y con la reactividad suficiente, previamente molidos y homogeneizados. Durante el proceso de cocción se produce una fusión parcial y una recombinación de los componentes de las materias primas dando lugar a nódulos de clinker de 5-50 mm. de diámetro, que esencialmente consisten en silicatos de calcio hidráulicos. Posteriormente el clinker mezclado con un 5 % de yeso (sulfato de calcio dihidrato) se somete a un proceso de molienda del cual resulta el cemento portland.”²

1.2. Materias primas

Como todo proceso industrial para la fabricación de este producto se requiere de materias primas, las cuales son:

- Un componente calcáreo (caliza), el mismo que contiene más de un 75% en peso de CaCO_3 (a este porcentaje se le denomina “título” o “valor de titulación”) y cuyo contenido es preferible que se encuentre en un valor entre 80 y 85% debido a que facilita el molido y la homogenización gracias a la marga dispersa.
- Un componente arcilloso (arcilla), el cual debe contener materiales como óxido de silicio (que debe contener cerca a 60% en peso), aluminio y hierro.
- Correctivos, que son compuestos de alta concentración, los cuales se colocan debido a que las materias principales (arcillas y caliza) no lo contienen en una cantidad suficiente.

¹ Definición abc

² Uniovi

- Aditivos, que son añadidos para dar al producto final ciertas características deseables en estos, por ejemplo, ponemos yeso al clinker para regular el tiempo de fraguado de éste.

Como se deja notar en los párrafos anteriores, la caliza contiene casi en su totalidad CaCO_3 , pero cuando no se tiene suficiente sílice y alúmina, es cuando debe agregarse las arcillas, las cuales contienen principalmente hidrosilicatos de alúmina, con porcentajes pequeños de otros elementos como el hierro. Entonces la arcilla aporta algunos óxidos al proceso, como son el de silicio, hierro y aluminio

1.3. Proceso de fabricación del cemento

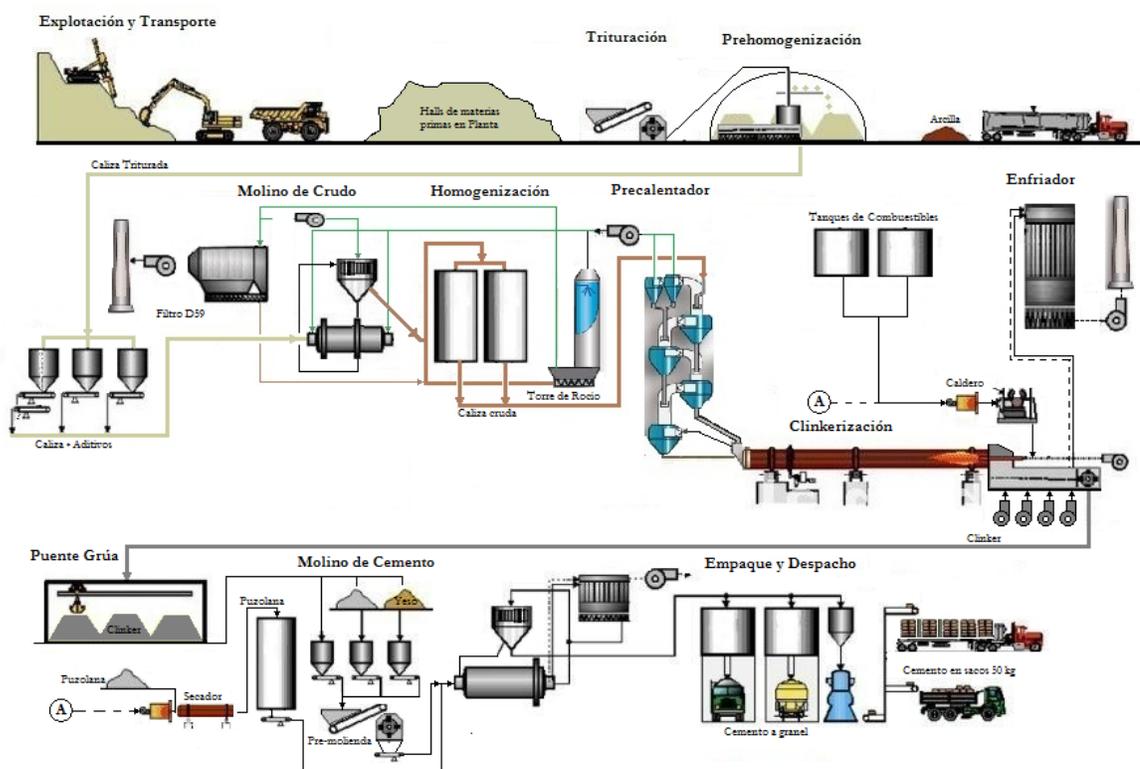


FIGURA N°1: Diagrama de flujo de procesos de la planta de cementos Guapán -UCEM

Fuente: Departamento de Investigación y Desarrollo de la planta Guapán

La fabricación del cemento por el proceso de vía seca involucra la secuencia de operaciones principales cuyas etapas se describen a breves rasgos a continuación:

1.3.1. Obtención y preparación de las materias primas

Como todo proceso se requiere de una planeación previa, entonces antes de comenzar se debe evaluar las minas de materias primas (calizas y arcillas), necesaria para conseguir la composición de óxidos deseados en el Clinker.



El Clinker suele tener una composición con respecto a óxidos como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 1:

Composición de óxidos del clinker

Óxidos componentes del clinker	Porcentaje
Óxido de calcio	60-69
Óxido de silicio	18-24
Óxido de aluminio	4-8
Óxido de hierro	1-8

Fuente: <http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>

Y esta proporción se obtiene al mezclar en las proporciones adecuadas las materias primas antes mencionadas.

Si se ha determinado que las materias primas serán de utilidad en nuestro proceso, se puede empezar a planificar la explotación de los recursos y su transporte.

Una vez conseguido la extracción de las materias primas, el material extraído debe ser triturado, ya sea en el mismo lugar de donde fue obtenido o en la misma planta, esta trituración puede ser realizada en 1,2, o 3 etapas dependiendo de la granulometría que se desea obtener. Luego pasa a la planta donde se almacena a la materia prima.

Después se realiza un proceso de pre-homogenización; el cual se lo realiza con métodos adecuados de apilamiento y extracción para dar una variabilidad mínima a las variables de calidad del proceso tales como el porcentaje de CaCO_3 y la granulometría. El método de apilamiento más común es el método Chevron.

Este material es luego transportado a un silo, junto al cual existen otros silos, los cuales contienen materiales correctivos que se irán mezclando en dosificaciones que dependerán de las características a las cuales se quieren llegar. Para finalmente pasar a un molino de crudo.

1.3.2. Molienda y cocción de las materias primas

En la molienda del crudo se suelen usar molinos de bolas, prensa de rodillos, o molinos de fuerza a compresión elevada; el objetivo de esta molienda es que el material adquiera un tamaño lo suficientemente pequeño, de manera que las reacciones químicas de cocción que se den en el horno puedan realizarse de la mejor manera.



Este molino de crudo puede llevar al material hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 0,05 mm.

Para asegurar que el proceso de clinkerización se realice de una manera efectiva el polvo que ingrese en el horno debe ser previamente homogenizado, de manera que nos genere un polvo de una composición química constante, esta homogenización puede ser realizada como en el caso de Guapán mediante la inyección de aire comprimido a impulsos para que dentro de los silos de homogenización se mueva el polvo.

Además el material crudo debe tener la finura que se especifique, caso contrario, este material será devuelto al molino de crudo, antes de continuar con el proceso de clinkerización en el horno.

1.3.3. Proceso de fabricación del clinker

Antes de señalar este proceso se define al clinker como:

“...producto proveniente de la cocción de una mezcla homogénea y definida de materiales arcillosos y caliza que proporcionan óxidos de calcio, de silicio, de alúmina y de hierro, en cantidades convenientemente calculadas.”³

Y una vez definido lo que es Clinker, decimos que al mezclar de manera conveniente las arcillas y la caliza finamente molidas; esta mezcla pasa por un proceso de calcinación en un horno, por el cual se llega a temperaturas cercanas a 1450°C obteniéndose así lo que llamamos clinker. En el proceso por vía seca las instalaciones cuentan con un pre-calentador o pre-calcinador para calentar el crudo, antes de que el material ingrese al horno rotatorio, con el propósito de recuperar el calor de los gases de combustión y realizar la descarbonatación parcial o total del material crudo y de esa forma conseguir un ahorro significativo en el consumo energético del proceso, en el horno ocurren las reacciones químicas y físicas que originan la nodulización en forma de gránulos de clinker y la formación de los principales compuestos mineralógicos que lo constituyen: silicatos dicálcicos y tricálcicos, aluminato tri cálcico y ferroaluminato tetracálcico.

El horno es una parte fundamental para la elaboración de cemento y tal como se mencionó previamente el proceso de cocción del material crudo llega hasta una temperatura cercana a los 1450°C, razón que hace necesario que el horno este revestido en su interior de material refractario que protege la carcasa o acero con el que está construido.

³ Lloret, 2012



El clinker que sale de este proceso tiene temperaturas altas, razón por la cual luego de salir del horno debe ser rápidamente enfriado. En cuanto a la forma como ingresa el material crudo a un horno rotativo se debe especificar que existen 4 tipos de proceso de fabricación de cemento: por vía húmeda, por vía seca, vía semi-seca y semi-húmeda dependiendo del contenido de humedad que tenga la pasta de crudo.

1.3.3.1. Vía húmeda

En el proceso de la molienda ya no solo se alimenta con el crudo, sino que también se lo hará con agua, de manera que esta mezcla (pasta o lechada) tenga una concentración de agua entre 30-40% y esto es lo que es alimentado al horno. Suele ser usado para materias primas de contenido de agua alto.

Algunas veces, debido a la naturaleza de las arcillas que se deslizan con el agua, se debe recurrir a mezcladores.

1.3.3.2. Vía seca

En este tipo de proceso se introduce el crudo en forma seca y pulverulenta, pero antes de llegar al horno, este crudo llega a un pre-calentador, donde el material gana calor por un intercambio de calor entre éste y los gases provenientes del horno.

Cabe recalcar que este proceso es el más común y el de menor uso energético, además que este tipo de proceso es el usado actualmente en la planta Guapán.

1.3.3.3. Vías semi-húmeda y semi-seca

En estos procesos, a la alimentación al horno se añade (en el de vía semi-húmeda) o elimina (en el de vía semi-seca) agua.

El material de alimentación tendrá una humedad cercana a un 15-20% y pasará por un pre-calentador y antes de que llegue al horno, el agua se habrá evaporado.

1.3.4. Molienda del cemento o molienda de acabado

La molienda de acabado es el proceso final de la fabricación del cemento en donde se realiza la mezcla y dosificación en cantidades controladas de clinker, yeso y materiales de adición ya sean de origen natural o artificial que caracterizan el tipo de cemento a fabricar. Este proceso puede ser realizado en prensas hidráulicas, molinos verticales u horizontales, pero el más común es el molino de bolas, cuyas dimensiones dependen de la capacidad de molienda.



Entre las adiciones permitidas están: escoria de alto horno, humo de sílice, filler de caliza, cenizas volantes, puzolanas naturales.

Finalmente, se procede con el proceso de empaquetado del cemento contenido en bolsas de 25 ó 50 kg, mediante el uso de máquinas ensacadoras rotativas de cemento para su despacho a través de camiones de transporte. También se despacha cemento a granel usando camiones cisterna que llevan el producto directamente al sitio de la obra en construcción.

1.4. Módulos

Los módulos son relaciones entre los óxidos mayoritarios (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) en el cemento portland, muchas veces empíricas o basadas en hipótesis, que han surgido de la experiencia en la fabricación del Clinker. Estos módulos son presentados a continuación:

Módulo hidráulico: Es representado como MH, fue introducido por Michaelis y es la relación entre el porcentaje de CaO y la sumatoria de los porcentajes de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , así:

$$MH = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

Para que el cemento obtenido tenga buenas condiciones de calidad, es recomendable que el valor obtenido de este módulo este comprendido entre los valores de 1,7 y 2,3. Si el módulo presenta valores inferiores, la resistencia mecánica del cemento resultante será insuficiente debido a que no se formará el C3S ni el β -C2S en cantidades suficientes; pero si es mayor el cemento se expandirá, debido a que un exceso de cal puede quedar en forma de cal libre, que al hidratarse dará lugar a este fenómeno.

Módulo de silicatos: Es representado como MdS y es la relación entre el porcentaje de SiO_2 y la sumatoria de los porcentajes de Al_2O_3 y Fe_2O_3 , así:

$$MdS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

Si el módulo tiene valores entre 2,2 y 2,6, estos son considerados como cementos de buena calidad, pero es aceptable que este módulo tenga valores entre 1,8 y 3,2. Este módulo representa la relación entre la fase sólida y líquida en la zona de clinkerización, ya que los compuestos con óxido de silicio son casi en su totalidad sólidos, el óxido de aluminio y férrico son líquidos.



A valores superiores a 3,2 se empeoran las condiciones de cocción del Clinker, debido a que desciende la fase líquida y se dificulta la formación de la costra, lo que provoca que se generen cementos de fraguado lento. Y para valores inferiores a 1,8 existe más fase líquida, condicionando la buena actitud a la cocción del Clinker y formación de la costra.

Módulo Silíceo: Es representado como MS, fue introducido por Mussnug y es la relación entre el porcentaje de SiO_2 y el porcentaje de Al_2O_3 , así:

$$MS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3}$$

Ésta relación, debe tener un valor entre 2,5 y 3,5, para que se tenga una buena condición de formación de la costra en la zona de cocción, si además el módulo de alúmina tiene valores entre 1,8 y 2,3.

Módulo de alúmina: Es representado como MF (debido a que también es llamado módulo de fundenets), fue introducido por Mussnug y es la relación entre el porcentaje de Al_2O_3 y el porcentaje de Fe_2O_3 , así:

$$MF = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

Ésta relación, debe tener un valor entre 1,5 y 2,5. Si el valor de este módulo tiene valores inferiores a 1,5, tendremos los ferro-cementos, los cuales tienen bajo calor de hidratación y un fraguado lento; pero si este valor es superior a 2,5 y con un módulo silíceo bajo, se obtiene por el contrario un cemento de fraguado rápido, debido a que se tendría que aumentar la cantidad de yeso para su regulación y se debilitaría la estabilidad química.

1.5. Transformaciones del crudo con la temperatura

La nomenclatura con la que se conoce convencionalmente a los constituyentes del Clinker es la siguiente:

- Silicato tricálcico: $3CaO.SiO_2$ C_3S
- Silicato bicálcico: $2CaO.SiO_2$ C_2S
- Ferroaluminato tetracálcico: $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ $C_4 AF$
- Aluminato tricálcico: $3CaO.Al_2O_3$ C_3A

En el proceso de formación del Clinker, el crudo sufre una serie de transformaciones físicas y químicas, las cuales se ilustran mejor a continuación:



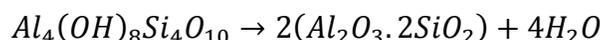
Tabla 2:

Transformaciones físico-químicas del clinker

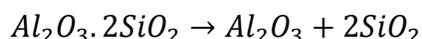
Temperatura (°C)	Proceso	Transformación química
Hasta 200	Secado: eliminación del agua libre.	$H_2O (l) + calor \rightarrow H_2O (g)$
100-400	Eliminación del agua absorbida	
400-750	Descomposición de la arcilla con formación de meta-caolinita	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
600-900	Descomposición de la meta-caolinita y otros compuestos con formación de una mezcla de óxidos reactivos	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
600-1000	Descomposición de la caliza con formación de CS y AC	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
800-1300	Fijación de cal por CS y AC con la formación de C_4AF	$CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
1250-1450	Nueva fijación de cal por C_2S	$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$

Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/LECCION23.Proceso.COCCION.pdf>

La fase de secado del crudo se da ya en el proceso de molienda del crudo mediante los gases que provienen del horno, eliminando de éste el agua libre; mientras que a temperaturas entre 100 y 400°C existe la eliminación del agua que se encuentra absorbida por los minerales de arcilla, incluida su agua interlamina. Por otro lado, en el tercer rango de temperaturas (400-750°C), el agua combinada químicamente se desprende, dando lugar a la meta-caolinita, como lo muestra su reacción:

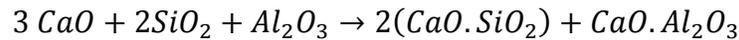


Esta meta-caolinita se descompone a temperaturas entre 600 y 900°C, de acuerdo a lo que indica esta reacción previamente señalada:



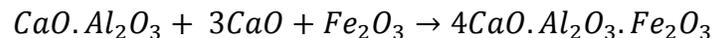


A temperaturas comprendidas entre 600 y 1000°C, en cambio se descompone el CaCO_3 que se encontraba en el material calcáreo. Además de esto el CaO que se forma por este proceso de descomposición sufre otras reacciones químicas, por las cuales se forma el CA y el CS de acuerdo a lo que se indica a continuación:



La última reacción se da entre estos compuestos en estado sólido. Estos procesos suelen darse en su totalidad en la primera zona del horno.

Luego los sólidos reaccionan formándose el aluminato tricalcico y el ferroaluminato tetracálcico, a partir de los 800°C:



A temperaturas comprendidas entre 1250 y 1450°C se dan las reacciones en presencia de la fase líquida fundida, que es la llamada etapa de clinkerización o sinterización.

Como era de esperarse al aumentar la temperatura los materiales cambiarán de estado, provocando que aumente la fase líquida, esta fase llegará a pesar del 20 a 30% en peso a temperaturas de 1450°C y a esta misma temperatura se formará ya el C_3S .



La temperatura de 1450°C se completa el proceso de clinkerización y el producto sale a una temperatura cercana a los 1000°C del horno, luego es enfriado a temperatura ambiente en el enfriador haciendo que los compuestos del Clinker cristalicen, quedando siempre algo de líquido que solidifica como vidrio, pero debemos intentar que esta velocidad de enfriamiento sea la apropiada, puesto que si resulta demasiado lenta, es casi seguro que se dé una conversión espontanea del silicato cálcico en polvo lo cual haría que se hidrate lentamente, haciéndolo inservible como aglutinante. Esto ocurre debido a la dilatación que se da cuando se transforma este compuesto de forma beta a gama.

A continuación se presenta la composición que suele tener el Clinker:

- C_3S : de 40 a 60%



- C_2S : de 20 a 30%
- C_3A : de 7 a 14%
- C_4AF : de 5 a 12%

1.5.1. Energía requerida para el proceso de fabricación del clinker

Al momento de eliminarse el agua ligada, se da un proceso endotérmico. La energía que es necesaria para que se de este proceso es de 539,05 kcal/kg de agua.

Pero como ya se había mencionado, además del agua libre existe el agua combinada en los materiales arcillosos, como ocurre con la montmorillonita, la caolinita o la illita, cuyas energías necesarias para su deshidratación (descomposición) son: 39,4 kcal/kg, 141 kcal/kg y 41,7 kcal/kg; respectivamente.

Además de esto están las reacciones de calcinación, entre estas están la de descomposición del carbonato de calcio y del carbonato de magnesio, cuyas energías necesarias para su descomposición son: 422 kcal/ kg y 310 kcal/kg respectivamente.

A estas reacciones de descomposición de los carbonatos se las puede representar de la siguiente manera:



Pudiendo M representar al Ca (en la calcita) o a Ca/Mg (en la dolomita) o al Mg (en la magnesita).

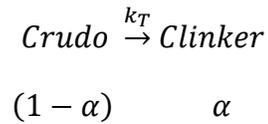
Pero además de las ya mencionadas energías requeridas para todos los procesos anteriores existen otras reacciones que son exotérmicas que se dan durante el proceso de clinkerización, las cuales son: la formación del C_2S , C_3S , C_4AF , C_3A y la deshidratación del hidróxido férrico, las cuales requieren de 171 kcal/ kg, 126,2 kcal/ kg, 20,1 kcal/ kg, 3,7 kcal/ kg y 26 kcal/ kg respectivamente.

1.5.2. Cinética de la cocción

En la formación del Clinker existen reacciones sólido-sólido, donde las reacciones se van a dar en la superficie de la mezcla cruda finamente dividida y donde la difusión de los reactivos a la superficie ocurre muy lentamente. Luego a temperaturas mayores a 1250 °C se forma fase líquida y esta sirve como medio para que se den las reacciones químicas, generalmente a velocidades más rápidas.



Entonces la velocidad de formación del crudo vendrá dado por:



Donde k_T va a representar la constante de velocidad de la reacción a una temperatura dada y α va a ser el grado de formación del Clinker a un tiempo de reacción dada.

De acuerdo a la ecuación de Arrhenius, k_T va a depender de la temperatura y de otras propiedades del material crudo como la superficie de contacto (según F_f), aumentando la velocidad de la reacción si aumentan estos factores; así:

$$k_T = F_f e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)}$$

Donde:

F_f : Factor de frecuencia

E_a : Energía de activación

T: temperatura

R: constante de los gases

Los componentes más reactivos, como las arcillas vemos que tienen una energía de activación menor que los no reactivos de la mezcla cruda, como el cuarzo.

Una energía de activación para la reacción con menor cantidad de cal hará que la formación de Clinker sea más rápida

Si queremos que aumente la velocidad de formación de Clinker por parte de los minerales no reactivos se debe aumentar el tiempo y/o temperatura de reacción.

Si aumenta la cantidad de caolinita en el crudo disminuirá la energía de activación del Clinker, mientras que si aumentamos la cantidad de carbonato, la energía de activación aumentará, disminuyendo la probabilidad de difusión en volumen de los iones de calcio.

Entonces, según lo que se ha dicho, la energía de activación variará dependiendo de los compuestos presentes en el crudo.

En la siguiente tabla se muestran las energías de activación para formar los principales componentes del Clinker:



Tabla 3
Energías de activación de los principales componentes del clinker

Phases	Ea (kcal/mole)	Reaction system
C ₃ S	~200	CaCO ₃ - alumino silicate like clay and slags
β-C ₂ S	127.76	CaO-SiO ₂ (3:1)
	14.63	CaCO ₃ -kaolinite
	61.57	CaCO ₃ -kaolinite (6:1)
	42.85	CaCO ₃ -kaolinite (9:1)
	25.10	CaCO ₃ -C ₂ AS (1.5:1)
	36.66	CaCO ₃ -C ₂ AS (4:1)
	39.40	CaO-SiO ₂ (2:1)
C ₃ A	48.41	CaO-Al ₂ O ₃ (3:1)
	119.34	CaCO ₃ -kaolinite (6:1)
	86.60	CaCO ₃ -kaolinite (9:1)
	35.50	CaCO ₃ -C ₂ AS (1.5:1)
	99.62	CaCO ₃ -C ₂ AS (4:1)
C ₄ AF	104.68	CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃
	70.98	C ₃ A-CF

Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/LECCION23.Proceso.COCCION.pdf>

Sin embargo resulta muy difícil dar una característica cuantitativa de la cinética de la formación de Clinker, por la gran cantidad de compuestos minerales y composiciones químicas en los crudos, complejidad de las etapas de las reacciones presentes en la clinkerización, condiciones no isotérmicas del proceso y la falta de un método de determinación de formación de Clinker simple y preciso.

1.6. Fórmulas de Bogué

Bogué formuló estas ecuaciones que ayudarán en el cálculo de la composición potencial del Clinker o componer clinker para cementos, pero cabe recalcar que estas fórmulas son solo válidas para el cemento portland y cuando se cumple la siguiente relación:

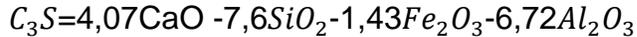
$$\frac{A}{F} > 0.64$$

La ventaja de estas fórmulas radica en que evitan desarrollar la estequiometría de los compuestos del cemento, con estas sencillas relaciones:

$$C_4AF = 3,04Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,69Fe_2O_3$$

$$C_2S = 8,6SiO_2 + 1,08Fe_2O_3 + 5,07Al_2O_3 - 3,07CaO$$



En estas fórmulas se dan ciertas suposiciones; las cuales se describen a continuación:

- a) La composición de las 4 fases mayoritarias es la dada anteriormente
- b) Todo el Fe_2O_3 está combinado en el C_4AF
- c) Toda la alúmina restante está en el C_3A

1.6.1. Características de los componentes del Clinker

A continuación se destacarán algunas de las propiedades del Clinker con respecto al cemento que este generará

C3S

Comercialmente es llamado alita y es la parte más importante del Clinker y confiere ciertas propiedades al cemento, como determinar la rapidez de fraguado y resistencia mecánica del cemento portland. A este compuesto se le atribuye el rápido desarrollo de resistencias iniciales, debido a que a las pocas horas de amasado comienza su fraguado y termina en menos de una semana. Este compuesto tiene un calor de hidratación moderadamente alto. Suele tener ciertas impurezas a proporciones bajas (de 2-4%) de elementos como Al_2O_3 , P_2O_5 , MgO , Cr_2O_3 que pueden influir en sus propiedades.

Tiene 6 formas cristalinas y por lo general son hexagonales o rectangulares.

C2S

Este compuesto, denominado también belita, determina las características del comportamiento de las resistencias a la compresión. Su fraguado se realiza lentamente y su desarrollo de resistencias es lento en un inicio, pero aumenta con el tiempo, por lo que su calor de hidratación es bajo.

Tiene pequeñas cantidades (1-3%) de Al_2O_3 , P_2O_5 , MgO , Cr_2O_3 y otros. En el Clinker es una solución del silicato bialtita β con estas impurezas nombradas.

En cuanto a sus formas cristalinas, tiene 5 en el rango de temperatura ambiente y 1500 °C, y en condiciones favorables de cocción se obtienen cristales en forma cúbica y forma soluciones sólidas de composición compleja.

C3A

El C3A proporciona una estabilidad química escasa, hidratación casi instantánea, razón por la cual presenta un fraguado en pocos minutos y por ende proporciona



resistencias tempranas y genera un calor de hidratación elevado, además de reaccionar con los sulfatos para proporcionar un aumento de volumen

C4AF

Este compuesto proporciona una estabilidad química aceptable en presencia de sales como las aguas marinas, hidratación lenta y regular, pero en cuanto a resistencias no contribuye en mayor cantidad a su desarrollo y genera un calor de hidratación moderado.

1.7. Métodos termodinámicos para el diagnóstico energético de las instalaciones industriales

La termodinámica, mediante el primer y segundo principio, junto con la conservación de masa, puede ser usada para diagnosticar el uso eficaz de la energía.

Así conociendo en un balance de masa y energía, todos los datos que lo conforman menos uno, se puede determinar el faltante, sin error, por aplicación de ecuaciones.

Sin embargo, para el diagnóstico termodinámico es necesario un balance de masa y energía, pero no es suficiente; para que lo sea, es necesario la aplicación del segundo principio, por un balance de entropía. Sin embargo la entropía es una función difícil de asimilar a nivel cuantitativo, sin mencionar que hay gran falta de datos entrópicos desde el punto de vista industrial, debido a que las sustancias aquí usadas son en general mezclas de sustancias puras en diferentes estados.

Pero a pesar de esto se puede realizar el diagnóstico energético sin este balance entrópico.

Las diferentes formas de encontrar un diagnóstico energético son:

- i. Diagnóstico convencional

En este tipo de diagnósticos, se suelen utilizar expresiones particularizadas, que informan el rendimiento del equipo que se analiza.

Estos se pueden clasificar en 2 tipos:

- a) Procesos cíclicos

Entre los que están:

- a1) Directos



Estos utilizan la fórmula ampliamente usada de: $\eta = W / Q_H$ para obtener el diagnóstico, en la que W representa la potencia desarrollada por el ciclo y Q_H la energía necesaria para obtener dicha potencia.

a2) Inversos

En general el parámetro de diagnóstico usado es el cociente entre la energía producida para en efecto deseado y la energía necesaria para producirla.

b) Procesos no cíclicos

b1) Con irreversibilidades mecánicas como fuente principal de pérdidas de rendimiento

El parámetro más comúnmente utilizado es el de “trabajo de rozamiento” o también llamado “pérdidas mecánicas” cuando se trata de un sistema en el cual se genera trabajo o este es absorbido. Pero en realidad este trabajo de rozamiento es un calor que no se ha podido convertir en trabajo útil, disipándose en forma de calor.

Pueden ser de 2 tipos:

- Proceso de derrame
- Procesos con intercambio de trabajo

Ambos suelen comparar los resultados respecto a un proceso ideal adiabático isoentrópico asociado, que vaya del mismo estado inicial a las condiciones isoentrópicas con la misma presión del estado final.

Si tomamos a h_1 como entalpía en el estado inicial, a h_2 como entalpía en el estado final y a h_{2s} como entalpía en estado isoentrópico final asociado, podremos calcular el proceso isoentrópico del proceso.

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (\text{si } h_1 > h_2, \text{ como en las turbinas})$$

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (\text{si } h_1 > h_2, \text{ como en los compresores})$$

b2) Con irreversibilidades térmicas como fuente principal de pérdidas de rendimiento

Estos procesos industriales tienen como objetivo el aislamiento térmico o el intercambio de calor; intentando en el primero que el paso de calor sea mínimo, coincidiendo en este caso el método de diagnóstico convencional con los objetivos del segundo principio.



Para el segundo caso, se intenta obtener una transferencia de calor que sea máxima. El calor cambiado “q”, vale:

$$q=UA\overline{\Delta T}$$

siendo: “U” el coeficiente de transferencia de calor del intercambiador, A su superficie y $\overline{\Delta T}$ la diferencia de temperaturas media logarítmica:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)}$$

Donde ΔT se refiere a la diferencia de temperaturas del fluido caliente y frío y a y b a los extremos del intercambiador.

Al analizar la fórmula notaremos que al incrementar A, U (factores que dependen del intercambiador y de los fluidos de trabajo) se puede aumentar el intercambio de calor; ocurre lo mismo al aumentar el $\overline{\Delta T}$ (factor que aumenta al disminuir la temperatura del refrigerante), pero este último resulta más económico.

En estos procesos se informa la cantidad de intercambio, pero no la calidad del mismo.

b3) Con irreversibilidad químicas como fuente principal de pérdidas de rendimiento

Clásicamente los procesos químicos han sido estudiados a partir del balance de entropía y de la función de Gibbs.

En casos en que la reacción no es completa, se usa esta información para el diseño de reactores, pero cuando las reacciones son completas, como es el importante caso de la combustión, técnicamente se utiliza el exceso de aire (o reactivo) y el cociente entre la energía cedida y la cantidad de combustible utilizado, para calibrar la calidad del proceso, pero estos métodos no informan del verdadero peso energético de la combustión sobre la planta, en lo referente a la calidad de éste.

ii. Diagnóstico por análisis entrópico

Es el más adecuado conceptualmente, debido a que se aplica a todos los procesos sin distinguir el tipo

Presenta algunos inconvenientes como el manejo de las unidades entrópicas y el desconocimiento del valor de la entropía en muchas sustancias complejas. El análisis entrópico necesita de los balances de masa y energía, por esto no pueden ser sustituidos ni excluidos mutuamente.



iii. Diagnóstico por análisis exergético

Su análisis es completo y se aplica a cualquier proceso, sin distinción de reversibilidades, porque recoge información de los 2 primeros principios de la termodinámica.

Lastimosamente, realizar análisis exérgicos resulta sumamente frustrante en industrias donde el empleo de energía es rudimentario.

El que la exergía dependa de las condiciones ambientales es una desventaja, especialmente donde los procesos dependan fuertemente de estas condiciones.

1.8. Balances de masa y energía en los hornos rotativos

Para poder realizar el balance de energía se requiere previamente conocer las masas de crudo, agua, aire, combustible que entran al sistema, las cuales deben ser iguales a la masa de polvos, aire, gases y Clinker que salga del sistema, es decir un balance de masa. Luego, en el balance de energía, la cantidad de energía que ingresa al sistema también debe ser igual a la cantidad de energía que sale de éste, debido a que la energía no puede ser creada ni destruida, pero si convertida de una forma a otra, entonces:

$$\sum Masa_{Entrada} = \sum Masa_{Salida}$$
$$\sum Energía_{Entrada} = \sum Energía_{Salida}$$

El propósito de estos balances de masa y energía es evaluar el estado actual del horno y de acuerdo al perfil de consumo calórico, son la base para desarrollar un sistema más eficiente. Estos balances muestran donde existe la mayor disipación de la energía, por lo que ayuda a detectar condiciones de operación anormales, además puede indicar posibles mejoras.

Los balances buscan proveer pautas para analizar las condiciones de operación del sistema y sirven para detectar oportunidades de mejora de los procesos para incrementar la eficiencia energética en la realización del proceso.

El consumo de combustible puede representar cerca del 20% en relación al costo total de la manufactura de cemento. El consumo normal de energía esperado es de 800 a 820 kcal/kg de Clinker, pero hay veces que estos valores pueden ser muy superiores, por eso los balances de masa y energía son considerados una herramienta bastante efectiva para controlar la energía de los procesos.



Para poder elaborar los balances de masa y energía se requiere de datos provenientes de mediciones de campo, información de variables que se miden durante el control de proceso (como temperaturas, caudales, presiones, producción), análisis de laboratorio (del clinker, combustible, crudo), datos históricos, etc.

Y una vez realizados los cálculos, se desarrollará un análisis con las variables más relevantes en cuanto al consumo de energía y pérdidas de esta.

El balance de energía debe mostrar todos los procesos que utilizan calor y determinar cuáles utilizan gran cantidad de calor y cuales usan poco calor; esto nos ayudará a conocer cuáles son las áreas a las que debemos enfocarnos más, para encontrar posibilidades de mejora.

Los balances en este documento serán realizados tomando como referencia básica la metodología descrita en el *Manual práctico de Combustión y Clinkerización* de autoría del Ing. Percy Castillo, manual que nos facilita pautas, fórmulas empíricas y cálculos que se suelen aplicar para la realización práctica de los balances de masa y energía en hornos rotativos utilizados para la fabricación del clinker.

Así, por ejemplo, para la obtención de calores sensibles, se puede utilizar la fórmula general del calor:

$$q = m \times c_p \times \Delta T$$

De donde m representa la masa que tiene ese calor, c_p representa el calor específico del material que tiene ese calor y ΔT la diferencia de temperaturas entre la temperatura del cuerpo y la temperatura de referencia.

En el mismo manual también se nos entregan los calores específicos de algunas sustancias, que van a resultar útiles al momento de realizar los balances, y estas son:

$$C_{p \text{ comb}} = 0,41 + 0,00043 \times T$$

$$C_{p \text{ aire}} = 0,247 + 4,4 \times 0,00001 \times T$$

$$C_{p \text{ crudo}} = 0,21 + 0,00007 \times T$$

$$C_{p \text{ agua}} = 1$$

$$C_{p \text{ clinker}} = 0,181 + 0,000071 \times T$$



$$C_{p \text{ gases}} = 0,23 + 0,00005 \times T$$

$$c_{p \text{ polvos perdidos}} = 0,23 + 0,00012 \times T \frac{3,076}{(273+T)}$$

De donde la T de cada una de estas ecuaciones es un promedio entre la temperatura de estudio y la temperatura de referencia.

Además hay otros tipos de calores que deben ser considerados para poder realizar este balance, como el calor aportado por la combustión, que se puede calcular de acuerdo a las fórmulas descritas en diferentes bibliografías y que son de uso generalizado en las plantas de cemento; así el calor aportado al proceso por la quema del combustible utilizado se puede obtener con la fórmula siguiente:

$$q = m \times \text{PCI}$$

Donde m representa la masa de combustible y PCI, el poder calorífico inferior del mismo.

En cuanto al calor necesario para evaporar el agua presente en el crudo, se utiliza la fórmula:

$$q = m \times h$$

De donde m representa la masa de agua presente en el crudo y h representa la entalpía de evaporización del agua.

También debemos tener presente la energía usada para la clinkerización. Esta energía, por fortuna, el Ing. Percy Castillo en su manual de clinkerización y combustión, sintetiza el cálculo considerando los calores que intervienen en el proceso de transformación del crudo, simplificando todo a la siguiente fórmula de origen estequiométrico:

$$q = 4,11 \times A + 6,48 \times M + 7,646 \times C - 5,116 \times S - 0,59 \times F$$

Donde:

q= calor de reacción

A= % de Al_2O_3 en el Clinker

M=% de MgO en el Clinker

C=% de CaO en el Clinker

S=% de SiO_2 en el Clinker

F=% de Fe_2O_3 en el Clinker

En cuanto al calor de radiación nos basamos en la ley de Stefan Boltzmann, la cual nos dice que:



$$E = \varepsilon\sigma T^4$$

Donde E es la energía, ε representa la emisividad del cuerpo, σ es la constante de Stefan Boltzmann y T la temperatura.

La σ , tiene un valor de $5.6701E-8 \text{ W/m}^2\text{°K}$, o como nos interesa en otras unidades:

$$\sigma = 5,6701E-8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°K}} \times \frac{14,34 \text{ cal/ min}}{1 \text{ W}} = 8,1309E-7 \frac{\text{cal}}{\text{min m}^2\text{°K}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$\sigma = 4,8789E-8 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2\text{°K}}$$

Por último para el cálculo de las pérdidas de convección se utilizan la fórmula del calor de convección:

$$q = h(T_p - T_r)A$$

Donde h representa el coeficiente de convección, T_p la temperatura de la pared y T_r la temperatura de referencia; mientras que A es el área considerada.

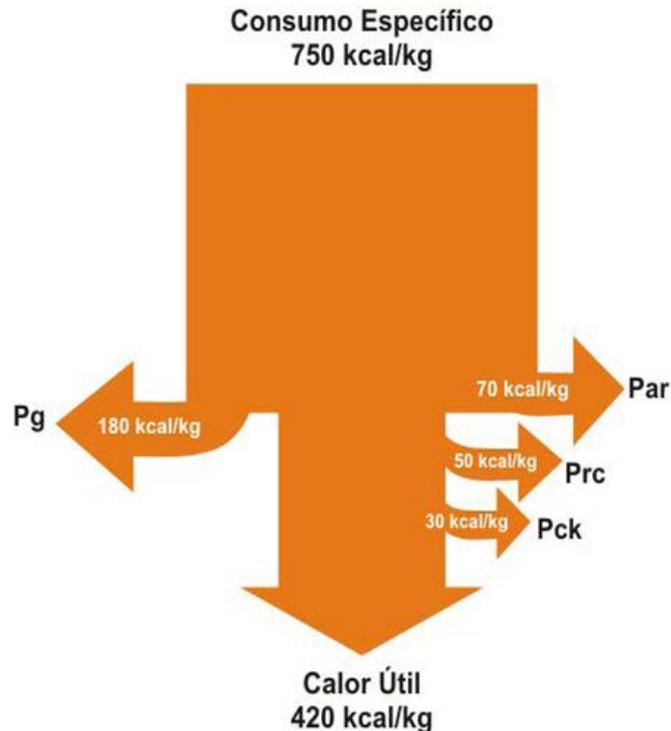
1.9. Diagrama de Sankey

Es un diagrama de un flujo de calor de un proceso, en el que las cantidades de calor de entrada son repartidas en la salida y estas cantidades de calor son representadas por la anchura de una banda.

Las unidades generalmente utilizadas para representarlas en el diagrama son:

- kg de combustible por 100 kg de producto
- m^3 por termias de gas por 100 kg de producto
- Calor del producto y pérdidas de calor como el porcentaje del calor del combustible.
- Calor del producto y pérdidas de calor como unidades de calor.

En el que las dos primeras opciones reflejan directamente el consumo de combustible. A continuación se presenta un ejemplo de un diagrama de Sankey:



Gráfica N°2: Diagrama de Sankey

Fuente:

http://www.combustionindustrial.com/MANUAL_PRACTICO_DE_COMBUSTION_Y_CLINKERIZACION.pdf

De donde: P_g = Calor perdido en los gases de salida, P_{ar} = Calor sensible perdido en el aire residual, P_{ck} = Calor sensible perdido en el Clinker, P_{rc} = Calor perdido por radiación y convección, Calor útil = Calor utilizado para la clinkerización

1.10. Proceso de clinkerización: sistema pre-calentador - horno - enfriador

El crudo que viene desde los silos de almacenamiento, debería ahora sufrir un proceso de descarbonatación, para lo cual se necesita llegar hasta una temperatura dada; para esto se utilizan en las plantas cementeras los pre-calentadores ciclónicos de suspensión, los cuales son intercambiadores de calor en donde ocurre el calentamiento del crudo mediante el aprovechamiento de los gases provenientes del horno que ascienden por los ciclones en contracorriente al flujo de material. Se ha demostrado que la mejor forma para realizar este intercambio de calor es por arrastre de polvo en la corriente de gases y la separación de ambos en etapas sucesivas de ciclones.

En el caso del pre-calentador de la planta Guapán se tienen 4 etapas, la primera de las cuales está dividida en 2 ciclones en paralelo, razón por la cual se la suele denominar "gemelos". El crudo ingresa por la parte superior de la segunda etapa



del precalentador y se desliza por el interior de este hasta alcanzar la boca de alimentación del horno, que es el final de la cuarta etapa.

En este proceso la alimentación alcanza una temperatura cercana a los 800°C, mientras que los gases disminuyen su temperatura a cerca de 330°C.

Mientras el material va bajando por el pre-calentador, también se va calentando la alimentación y comienza su transformación química.



Foto N°1: Pre-calentador de la Planta Guapán- UCEM

Fuente: El autor

Y dentro del horno, el Al y el Fe actúan como elementos fundentes para llegar a la fase líquida y el Si y el Ca disminuyen el tiempo de reacción; así mismo ayudan a que la temperatura necesaria para que se dé la reacción disminuya (temperatura cercana a 1450°C).

El horno es un tubo de acero, cuyas dimensiones son de 4,11 m de diámetro interno y una longitud de 57,1 m y fue fabricado por la empresa americana Fuller Company. Este horno funciona con residuo petrolero (equivalente a un Fuel Oil #6, americano) como combustible, teniendo una capacidad de producción de 1100 TMPH, el horno es accionado por un motor eléctrico principal de 250 HP y está en operación desde el año de 1993.

El horno se encuentra apoyado sobre 3 bases con aros de rodadura y rodillos que permiten su movimiento. El horno de esta empresa gira a un rango de entre 1,8 a 2 rpm dependiendo de su ratio de producción de clinker. Dicho movimiento de rotación es impulsado por un piñón que se encuentra acoplado a una corona rígidamente vinculada al cilindro de acero.

El quemador se encuentra en la parte inferior del horno, al extremo opuesto al ingreso del material, los gases de combustión que se producen recorren todo el horno, calentándole y estos son extraídos primero a través de un ventilador



principal de tiro forzado (F4A) hacia el pre-calentador de suspensión y luego pasan al molino de crudo, cuando éste se encuentra en operación, para finalmente llegar a un colector de polvos, donde se separan los polvos de harina cruda, que fueron arrastrados del sistema de molienda junto con los gases de combustión, pasando los gases limpios a la chimenea donde son expulsados al ambiente. Cuando el molino está parado no se pasa por el molino, sino que los gases pasan a una torre de enfriamiento de los gases de combustión y luego van hacia el colector de polvos, para separar el polvo del gas y hacer que el aire limpio se evacue por la chimenea.

El clinker obtenido en el proceso de cocción en el horno se deposita en un enfriador a una temperatura promedio de 1000°C , que tiene un sistema transportador de vigas metálicas que descargarán el material que ha sido enfriado a través de la inyección de aire frío proveniente de 5 ventiladores. Este aire recupera el calor proveniente del clinker y es usado para ayudar en la combustión del crudo de petróleo (aire denominado "aire secundario" que alcanza una temperatura cercana a los 1000°C), el remanente de aire de enfriamiento que arrastra también polvo de clinker es conducido a un colector de polvo en donde se recupera el polvo de clinker y el aire limpio es expulsado al ambiente mediante el uso de otro ventilador de equilibrio del sistema de la enfriadora de clinker.



Foto N°2: Horno rotatorio de la Planta Guapán- UCEM

Fuente: El autor

El aire que es expulsado por el ventilador, es llevado a un intercambiador de calor en el que existen varios ventiladores para llevar aire del ambiente y lograr que se enfríe el aire con polvo proveniente del horno, para poder separar el polvo del gas caliente a una temperatura que permita operar el filtro de mangas, equipo en donde se recolecta el polvo de Clinker que ha sido separado del aire con polvo succionado por el ventilador del filtro (equipo F27) y que luego evacúa el aire limpio por la chimenea del sistema del enfriador.



Para poder manipular el combustible que ingresa al horno se lo calienta mediante un sistema intercambiador de calor por aceite térmico que transfiere calor suficiente para elevar la temperatura del combustible a una temperatura cercana a los 135°C.

1.11. Herramientas informáticas y su importancia

Las herramientas informáticas son programas, aplicaciones o instrucciones que ayudan a la elaboración de un proceso, para que este se pueda realizar de una manera más sencilla.

Estas herramientas a ocupar deben ser adecuadas para la o las tareas a realizar, porque cada herramienta está pensada para una o varias funciones en específico.

Es por esta razón que se busca el diseño de una herramienta que sea capaz de desarrollar de un balance de masa y energía en el sistema pre-calentador-horno-enfriador, porque a pesar de que se conoce como realizarlo no ha habido un interés real por parte de la empresa de realizar este balance de una manera metódica y permanente debido a las dificultades que esto acarrea y a que no existe un procedimiento pre-establecido que guíe a los supervisores del proceso para llevarlo a cabo de manera periódica y suficientemente planificada.

Una herramienta informática guía exactamente qué información se debe recoger dentro de la empresa para llevar al cabo un balance y simplificar los cálculos y el tiempo de obtención de resultados.

2. Metodología a seguir para la realización del balance de masa y energía

2.1. Determinación de los flujos de masa

Antes de determinar que medir dentro de la empresa se debe tener claridad qué es lo que se puede medir y para que se lo va a hacer. Para ello, será de ayuda, primero determinar cuáles son las corrientes que intervienen en el proceso. En el diagrama de bloques que se presenta a continuación se explica los flujos de entrada y salida de masa que se deben conocer o determinar para la realización del balance de masa:

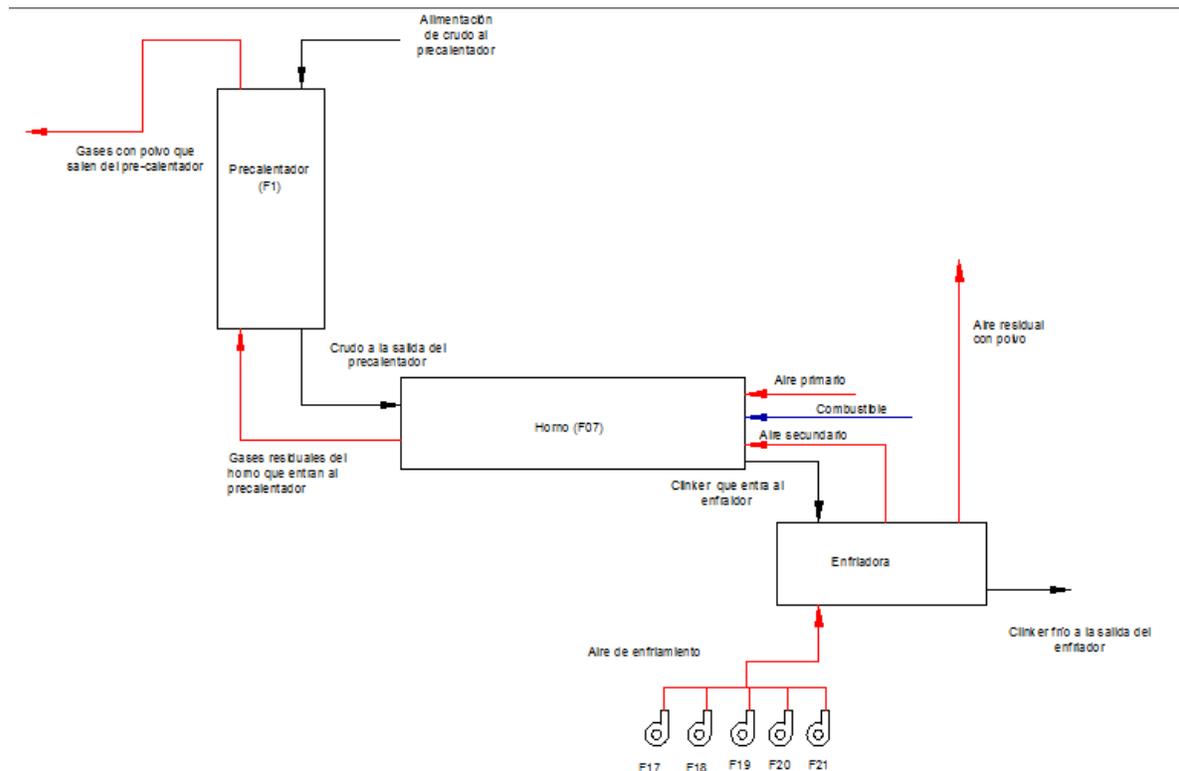


Figura N°3. Diagrama de entradas y salidas del sistema pre-calentador-horno-enfriadora (Planta Guapán)

Fuente: El autor

En donde las flechas de colores rojo, azul y negro indican el estado en el que se encuentran las corrientes, siendo estos gaseoso, líquido y sólido respectivamente.

De este diagrama se deducen varias corrientes y éstas serán divididas en corrientes de entrada y de salida del sistema.



2.1.1. Corrientes másicas de entrada al sistema

Alimentación del crudo (m_{alim}): Es la primera corriente en consideración, esta corriente es sólida y suele tener un caudal másico, dependiente de la capacidad de producción del horno, características químicas del crudo y de las condiciones de operación del horno (variando, en condiciones normales de operación, flujos entre 65-75 t-h). La humedad que contiene el crudo que ingresa, tiene normalmente valores entre 0,6 a 1% de humedad. La entrada de esta corriente de material es por la parte superior del pre-calentador, como ya se explicó con anterioridad, en la parte de la descripción del sistema pre-calentador-horno-enfriador. Este flujo de material es conocido y se mide utilizando una báscula dosificadora con sensor de peso instalada en la línea de alimentación de material crudo que ingresa por el elevador de cangilones que conduce el material hacia el pre-calentador.

Combustible (m_{comb}): Este es un flujo de masa necesario para la obtención del calor necesario para el proceso de cocción que se da en el horno rotativo para la fabricación de clinker. Este flujo de combustible, en el caso de la Planta Guapán, es líquido y es la corriente que ingresa al sistema, por el quemador del horno, previamente el combustible de residuo de petróleo es precalentado desde los tanques de almacenamiento para elevar la temperatura del mismo hasta valores cercanos a 130°C que es la temperatura a la que ingresa al quemador para lograr su combustión total, para ello se utiliza un sistema de intercambio de calor que aprovecha el calor transferido por aceite térmico que es acondicionado por un sistema auxiliar de quemador de crudo de petróleo.

Aire primario ($m_{Aire\ primario}$): Como ya se conoce el proceso de combustión necesita de oxígeno, el cual es introducido al sistema como aire. Entonces el aire que se utiliza para la realización de la primera combustión y que entra en contacto directo con el combustible es el aire primario. Por este aire se da forma a la llama del horno y es el responsable de la generación de turbulencia en el aire de combustión, provocando que se atrape al aire secundario en la llama.

Este es otro flujo másico que ingresa al sistema y lo hace por la tobera y ducto de aire primario del quemador del horno. Un ventilador (F31) es el que proporciona y controla la entrada de este flujo de aire para la combustión y suele funcionar a máxima capacidad.

Aire de enfriamiento (m_{ae}): Esta corriente de masa que ingresa al sistema, lo hace por el enfriador, y tal como se ve en el diagrama de bloques, proviene de cinco ventiladores que controlan su ingreso. La cantidad necesaria de aire de enfriamiento dependerá de la cantidad de clinker producido en el horno, suele



representar valores entre $90000 \text{ m}^3/\text{h}$ y $105000 \text{ m}^3/\text{h}$ para una producción normal del horno de la Planta Guapán (1000 tmd en clinker) Esta corriente de masa de aire que ingresa al sistema, luego de cumplir con su misión de enfriar al clinker que sale del horno, es separada en dos corrientes: aire que es expulsado del sistema del enfriador (aire residual) y en una corriente que recupera el aire calentado por el clinker que cede su calor y que se conoce comúnmente como aire secundario que se aprovecha en el quemador del horno para lograr la combustión completa del crudo de petróleo.

Aires falsos ($m_{\text{Aire Falso}}$): Esta es una de las corrientes de aire de entrada, que para fines del cálculo del balance, es la más difícil de determinar y como vemos no lo hemos incluido en el diagrama, debido a la imposibilidad práctica de medir cantidades de aire que ingresan al sistema (dentro del volumen de control que explica la Figura 4). Por lo común, es aire de ambiente que ingresa al sistema a través de espacios de apertura u orificios dentro de este (sellos de estanqueidad de la entrada y salida de horno rotativo. Compuertas o mirillas de inspección y limpieza de la instalación del pre-calentador). Los “aires falsos” que ingresan al sistema afectan en general a la eficiencia térmica del proceso; es difícil identificar con certeza los lugares por los cuales ingresa al sistema, por lo que siempre existirán. Entonces, uno de los objetivos de toda empresa cementera será siempre minimizar la magnitud de esta corriente comúnmente llamado “aire falso”. En el balance o diagrama de Sankey esta corriente se expresa generalmente por diferencia como “Potros”.

2.1.2. Corrientes másicas de salida del sistema

Clinker (m_{clinker}): Es el producto de la cocción del crudo denominado clinker. Si relacionamos el flujo de alimentación de crudo con el de masa de Clinker obtenido, de acuerdo al factor de transformación química de crudo-clinker debido a las pérdida al fuego que se produce en la cocción, sabemos que esta relación es igual a 1,6 aproximadamente, representando en masa de clinker un 55.9% de la alimentación en peso. En forma práctica, la única manera de determinar correctamente la cantidad de clinker producida por el horno, será pesando el material de clinker en un tiempo determinado y que generalmente para fines del balance másico se lo realiza en un tiempo mínimo de 8 horas condicionando a que haya estabilidad en las condiciones y parámetros de control operativo del sistema en general.

Aire residual ($m_{\text{aire res}}$): Este es el aire que es expulsado del enfriador al ambiente. Como esta corriente de aire está en contacto con el clinker, va llevando partículas de este, por lo que antes de que vaya a la chimenea debe ser previamente separado de estos polvos y la empresa lo hace mediante un colector de polvos de



mangas, pero, para que las mangas fabricadas de tejido filtrante de éste colector de polvos no se quemem con la temperatura a la que ingresa el aire, esta corriente pasa primero por un intercambiador de calor que enfría la corriente de gases calientes.

Polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas ($m_{polvo\ de\ clinker}$): Esta corriente de material es luego adicionado al Clinker que sale de la enfriadora, para convertirse en producto de este proceso. Esta corriente de material suele ser cerca del 5% del material que es ingresado como alimentación al sistema.

Gases de salida del pre-calentador (m_{gas}): Por esta corriente de gases salen los gases que resultaron de la combustión del residuo de petróleo, además del CO_2 que se produjo de la descarbonatación del crudo en el proceso de producción del clinker. Esta corriente lleva además el aire en exceso que entró al sistema y no ayudó en la combustión, y sumado a esto lleva partículas de polvo de crudo que fue arrastrado en el pre-calentador. Esta corriente es la corriente más grande de salida del sistema y debido a la velocidad a la que se encuentra este flujo, en el ducto denominado comúnmente “downcomer”, apenas sale del pre-calentador es muy difícil medir el flujo másico y composición en las partes más altas de este ducto.

Polvo de crudo recuperado del colector de polvos ($m_{polvo\ de\ crudo}$): Antes de mandar los gases de salida del pre-calentador al ambiente, se enfría a los gases, para que pasen por un colector de polvos, en donde se recupera el polvo que es arrastrado por los gases de salida. El flujo de estos polvos, de acuerdo a mediciones históricas realizadas en la empresa varían en alrededor del 10 al 12% del crudo que ingresa a la alimentación dependiendo de la eficiencia con la que trabaja la instalación del pre-calentador.

Resumiendo todo esto en una tabla, para que sea más sencillo de entender, se tiene:

Tabla 4

Resumen de corrientes de entrada y salida de masa del sistema estudiado

DATOS DE ENTRADA	NOTACIÓN	UNIDADES	DATOS DE SALIDA	NOTACIÓN	UNIDADES
Crudo seco	$m_{crudo\ seco}$	kg/h	Clinker	$m_{clinker}$	kg/h
Agua en el crudo	$m_{humedad}$	kg/h	Gases de salida	m_{gas}	kg/h
Combustible	m_{comb}	kg/h	Aire residual	$m_{aire\ res}$	kg/h
Aire de enfriamiento	m_{ae}	kg/h	Polvos de arrastre de crudo	$m_{polvo\ de\ crudo}$	kg/h
Aire primario para la combustión	$m_{Aire\ primario}$	kg/h	Polvos de arrastre de Clinker	$m_{polvo\ de\ clinker}$	kg/h
Aire falso	$m_{Aire\ falso}$	g/h			

De donde se puede apreciar que la alimentación de crudo al pre-calentador ha sido dividida en 2 corrientes: masa de crudo seco y masa de agua en el crudo, esto se debe a que esto facilita los cálculos a la hora de calcular el calor de evaporación de dicha agua, como se indicará más adelante.

2.2. Determinación de los flujos de energía

Para determinar los flujos de entrada y salida de energía, la mejor manera es guiarnos en el diagrama de bloques que se presenta a continuación:

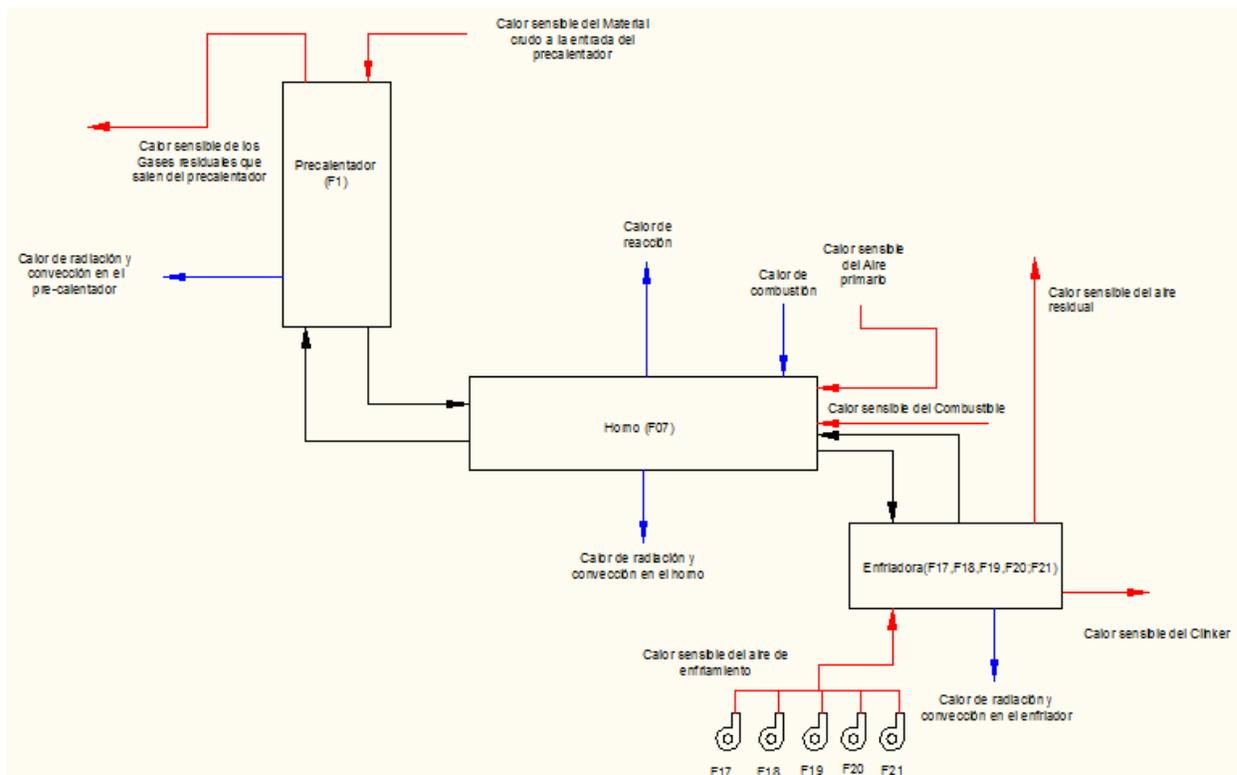


Figura N°4. Diagrama de entradas y salidas de energía en el sistema pre-calentador-horno-enfriadora (Planta Guapán)

Fuente: El autor

De donde las flechas de colores rojo indican el calor que ingresa o egresa asociado a un material que sale o entra, mientras que el color negro indica que hay corrientes asociadas, pero que el calor no entra ni sale del sistema. Además está el color azul que indica que hay calores que ingresan o egresan del sistema, pero que no están asociadas a ninguna corriente del balance de masa.



De este diagrama deducimos varias corrientes y las dividiremos en corrientes de entrada y de salida del sistema. Como ya describimos las corrientes de material, al momento de describir su corriente de energía, como se tratan de calores sensibles y van a estar directamente relacionados con su temperatura, en vez de describir la corriente, solo se darán valores aproximados de su temperatura.

2.2.1. Corrientes calóricas de entrada al sistema

Calor sensible de la alimentación de crudo (q_{crudo}): La temperatura de esta corriente es cercana a los 47 °C.

Calor sensible del combustible (q_{comb}): Debido al calentamiento que recibió esta corriente antes de ingresar al sistema, la temperatura está cerca de 130 °C.

Calor sensible del aire primario ($q_{Aire\ primario}$): Como este aire es llevado desde el ambiente por el ventilador que controla su paso, esta corriente lleva una temperatura cercana a la ambiental.

Calor sensible del aire de enfriamiento ($q_{aire\ enf}$): Este flujo tiene una temperatura también cercana a la ambiental.

Calor sensible de aires falsos ($q_{Aire\ falso}$): Esta es la corriente que se cuela desde el ambiente, por lo que tendrá una temperatura parecida a este y generalmente en los balances suele despreciarse.

Calor de combustión ($q_{Combust}$): Este es el calor aportado por el combustible, durante su quema. Este valor, va a depender de la cantidad de combustible alimentado y de su poder calorífico.

2.2.2. Corrientes calóricas de salida del sistema

Calor sensible del Clinker ($q_{Clinker}$): Ésta corriente de salida del sistema tiene una temperatura variable entre 90 °C a 130°C, dependiendo de la eficiencia con la que opera el enfriador de clinker.

Calor de evaporación del agua del crudo (q_{evap}): Éste calor es el calor aprovechado por el agua de crudo para cambiar su estado de estado líquido a gaseoso, pasando a formar parte luego de los gases de salida del pre-calentador.

Calor sensible del aire residual ($q_{Aire\ res}$): Esta corriente luego de haber enfriado el Clinker a la salida del horno, es calentado bastante, por lo que su temperatura a la salida del sistema es cercano a 290°C.



Calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas ($q_{polvo\ k}$): Debido a que esta corriente sale junto con el aire residual, su temperatura sería, si no la misma, muy parecida.

Calor sensible de gases de salida del pre-calentador ($q_{gases\ de\ salida}$): A la salida del precalentador, antes de llegar al ventilador de tiro que le obliga a bajar por el ducto “downcomer”, tiene una temperatura cercana a 360°C.

Calor sensible del polvo de crudo recuperado del colector de polvos (q_{polvo}): Debido a que esta corriente sale junto con los gases de salida del pre-calentador, su temperatura sería, si no la misma, muy parecida

Pérdidas de calor por radiación (q_{rad}): Para averiguar cuánto de energía se pierde de esta forma dividimos en pérdidas por radiación tanto en el pre-calentador, horno y en el enfriador. La radiación es la energía que se emite por un cuerpo, debido a su temperatura. La radiación se da sin la necesidad de que los cuerpos estén en contacto entre sí y la transferencia de calor depende de la diferencia de temperatura entre los 2 cuerpos.

Pérdidas de calor por convección (q_c): Para esta energía también tomamos en cuenta los tres equipos por separado. Este tipo de calor se pierde por medio de un fluido, en nuestro caso el aire, que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas, es decir se transporta el calor por medio del fluido.

Según la bibliografía, el calor típico de pérdidas de energía superficiales de cada uno de los equipos del sistema es:

Tabla 5

Pérdidas de energía superficiales típicas en las paredes

Equipo	Pérdida superficial típica (Kcal/kg de Clinker)
Pre-calentador	25
Horno	60
Enfriador	6

Fuente: http://www.asocem.org.pe/bivi/sa/cur/fls/HorSis/balances_termicos.pdf

Calor de reacción: Es el calor necesario para que se dé la cocción del clinker. De acuerdo a la bibliografía este valor suele ser cercano a 420 kcal/kg de clinker.

Resumiendo esto en una tabla, se tendría:



Tabla 6

Resumen de corrientes de entrada y salida de energía del sistema estudiado

Datos de entrada	Notación	Unidades	Datos de salida	Notación	Unidades
Calor sensible de crudo	q_{crudo}	kcal/h	Calor sensible de Clinker	$q_{clinker}$	kcal/h
Calor sensible de combustible	q_{comb}	kcal/h	Calor sensible de polvo crudo	q_{polvo}	kcal/h
Calor de combustión	$q_{combust}$	kcal/h	Calor sensible del aire residual	$q_{aire\ res}$	kcal/h
Calor sensible del aire de enfriamiento	$q_{aire\ enf}$	kcal/h	Calor sensible de gases de salida	$q_{gases\ de\ salida}$	kcal/h
Calor sensible del aire primario	$q_{aire\ primario}$	kcal/h	Calor de reacción para el Clinker	$q_{reacción}$	kcal/h
Calor sensible del aire falso	$q_{aire\ falso}$	kcal/h	Calor de evaporación del agua	q_{evap}	kcal/h
			Calor sensible de polvo de Clinker	$q_{polvo\ kk}$	kcal/h
			Pérdidas de calor por convección	q_{rad}	kcal/h
			Pérdidas de calor por radiación	q_c	kcal/h

2.3. Toma de datos

Para poder realizar el balance térmico en la planta se debe, en primer lugar, recopilar todos los datos posibles que van a servir para la realización de éste.

En el proceso de toma de datos, debe tenerse en cuenta, que existen ya en la planta, ciertos lugares donde se toman datos para controlar correctamente el proceso. Por lo tanto, no se necesita realizar una medición directa en campo, sino que existen equipos de medición “insitu” que registran la medición y son controlados en el panel de control. Es desde este último lugar que se obtienen varios datos que nos servirán para el cálculo del balance y que, para el caso de la planta Guapán, se detallan a continuación:



Tabla 7

Simbología y descripción de las variables obtenidas en el panel de control de la Planta Guapán-UCEM

Símbolo	Descripción de los datos	Código del equipo medidor	Unidades
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo al pre-calentador	F04	t/h
m_{comb}	Caudal másico de alimentación de combustible al horno	F50	kg/h
Q_{F17}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento (ventilador F17)	F017ITM01	m^3/h
Q_{F18}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento (ventilador F18)	F018ITM01	m^3/h
Q_{F19}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento (ventilador F19)	F019ITM01	m^3/h
Q_{F20}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento (ventilador F20)	F020ITM01	m^3/h
Q_{F21}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento (ventilador F21)	F021ITM01	m^3/h
P_{F17A}	Presión del aire de enfriamiento en la cámara A (F17)	F017ITM02	mbar
P_{F17B}	Presión del aire de enfriamiento en la cámara B (F17)	F017ITM03	mbar
P_{F18A}	Presión del aire de enfriamiento en la cámara A (F18)	F018ITM02	mbar
P_{F18B}	Presión del aire de enfriamiento en la cámara B (F18)	F018ITM03	mbar
P_{F19}	Presión del aire de enfriamiento en el ventilador F19	F019ITM02	mbar
P_{F20}	Presión del aire de enfriamiento en el ventilador F20	F020ITM02	mbar
P_{F21}	Presión del aire de enfriamiento en el ventilador F21	F021ITM02	mbar
Tgsp	Temperatura de los gases a la salida del pre-calentador	ISE03	°C
Tarsch	Sensor de temperatura del aire que sale del enfriador como aire residual	F027-TE560	°C
T_{gas}	Sensor de la temperatura de salida de gas de la etapa 1 A	TE312-C	°C
---	Sensor fluxómetro de combustible principal	F30 4.1.12	kg/h
---	Sensor fluxómetro de combustible de retorno hacia adelante	F30 4.1.18	kg/h
T_{comb}	Sensor de temperatura del bunker	F30 4.1.08	°C

Pero además de los datos anteriores, debemos tener presente que van a ser necesarios, para algunos cálculos, otros datos que provienen de la realización de los análisis físico-químicos que se realizan en el Laboratorio de Control de Calidad relacionados con la calidad del crudo y clinker que se está utilizando y obteniendo en el desarrollo del proceso de fabricación del clinker; como son:

Tabla 8

Simbología de las variables obtenidas en el laboratorio de Operaciones Físicas y Químicas de la Planta Guapán-UCEM

Símbolo	Descripción de los datos
hum	Humedad del crudo
F	Pérdidas al fuego
Al_2O_3	Porcentaje de Al_2O_3 en el Clinker
Fe_2O_3	Porcentaje de Fe_2O_3 en el Clinker
SiO_2	Porcentaje de SiO_2 en el Clinker
MgO	Porcentaje de MgO en el Clinker
CaO	Porcentaje de CaO en el Clinker

El sistema pre-calentador-horno-enfriadora ya fue detallado en la parte teórica de este documento, sin embargo, es necesario que se tenga una base para el estudio de los balances, por lo que, a continuación se explica y detalla el lugar o sección del proceso, enfocado a los puntos de muestreo donde se debe tomar los datos y los códigos de ciertas partes de las instalaciones.

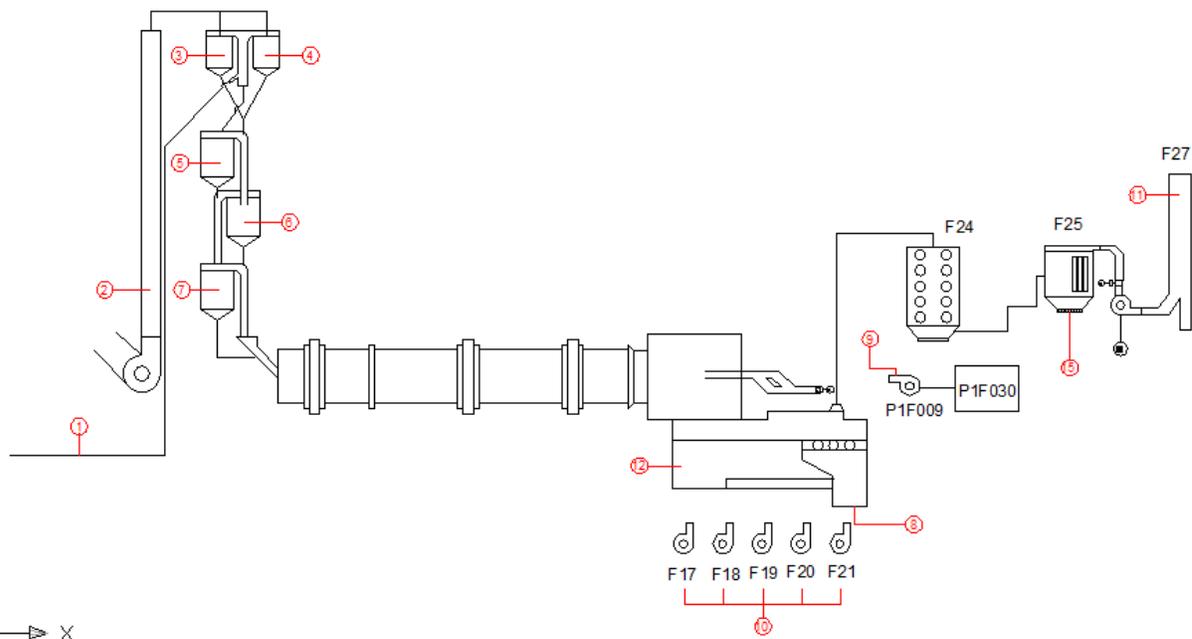


Figura N° 5. Diagrama de puntos de muestreo en el sistema pre-calentador-horno-enfriadora (Planta Guapán)

Fuente: El autor en base a diagramas explicativos encontrados en la planta.

En la figura se toma en cuenta casi todos los puntos de muestreo que se nombrarán a continuación, con la única excepción del punto 13 y 14 (que se encuentran en el filtro del área de molienda y en el tornillo en la



salida de la torre de enfriamiento) y los puntos 16 (que se encuentra en el hall de almacenamiento de clinker, al igual que el punto 15, pero a éste se puede hacer referencia, al señalar a su filtro).



Fotos 3 y 4. Punto de muestreo N°1: Salida de la alimentación de los silos de almacenamiento (aerodeslizador).

Fuente: El autor

Punto 1: En este punto se debe medir la temperatura el crudo, antes de su ingreso al pre-calentador, para realizar el muestreo en este punto se requiere de un pirómetro óptico o de un termómetro, la medición con cualquiera de los dos instrumentos, no muestran una variación significativa.



Foto 5. Punto de muestreo N°2: Ducto de gases de salida del pre-calentador (Downcomer)

Fuente: El autor

Punto 2: En este punto de muestreo se encuentra el downcomer (conducto de salida de los gases del pre-calentador), antes de que ingresen al ventilador de tiro (F4A) que evacúa los gases. Es en esta locación que se realizará la medición de la composición de los gases de salida, junto con su presión estática, dinámica y temperatura. Para la realización de toma de muestras en esta zona se requiere la utilización del tubo de pitot.



Fotos 6,7,8,9,10. Puntos de muestreo N° 3, 4, 5, 6 y 7: Etapas del pre-calentador

Fuente: El autor

Puntos 3, 4, 5, 6 y 7: Estos puntos se encuentran ubicados en los ciclones del pre-calentador. Aquí se mide la temperatura de las paredes de cada etapa en el pre-calentador, datos que nos sirve para calcular las pérdidas de calor a través del pre-calentador; para medir con más exactitud se hace 4 mediciones, uno a cada lado de la pared de la parte cilíndrica y otras 4, siguiendo el mismo proceso a cada lado de las 4 paredes del pre-calentador en la parte cónica y posteriormente se obtiene un promedio; para esto se puede hacer uso de un termógrafo o del pirómetro óptico, pero el termógrafo nos permite ver mejor como están distribuidas las temperaturas en cada ciclón. La manera de toma de datos descrita sirve para cada uno de los ciclones a excepción de los ciclones de la primera etapa, los cuales, en el último piso tienen la parte cilíndrica a ras del suelo, pero la parte cónica se encuentra en el sexto piso del pre-calentador, a una distancia considerable con respecto al suelo, por lo que al tomar los datos se estará muy alejado del punto de donde se planea realizar la medida, por lo que no se realizaron mediciones en la parte cónica de esa etapa. De estas 8 mediciones obtenidas en cada ciclón se calcula un promedio y esta será la temperatura general del ciclón. Además en esta zona de muestreo se encuentran también los ductos del pre-calentador; para la toma de temperaturas de éstos se toma una temperatura de cada ducto en cada piso, de una temperatura en la parte superior de un ducto y otro en la parte inferior, para finalmente obtener un promedio de todas las temperaturas tomadas en los ductos.



Foto 11 y 12. Punto de muestreo 4: Salida de Clinker del enfriador

Fuente: El autor

Punto 8: Esta área se encuentra a la salida del enfriador y también es la salida del Clinker del sistema considerado, razón por la cual es fundamental en esta zona medir la temperatura de salida utilizando un pirómetro óptico.



Fotos 13 y 14. Punto de muestreo N°9: Manómetro para el aire primario y zona de ingreso de aire para el ventilador (F31)

Fuente: El autor

Punto 9: Es en esta área donde funciona el ventilador para el ingreso del aire primario, en ésta zona se debe medir la temperatura de entrada promedio del aire primario, siendo muy similar a las temperaturas del aire de enfriamiento medidas en el punto 10. Estas temperaturas pueden ser medidas mediante un higrómetro. Además aquí se encuentra el manómetro que mide la presión de aire que ingresa como aire primario.



Fotos 15 y 16. Punto de muestreo N°10: Zona de ingreso de aire de enfriamiento en los ventiladores del enfriador de clinker (F17, F18, F19, F20 y F21)

Fuente: El autor

Punto 10: Es el área de donde se obtiene el aire que ingresa a los ventiladores para el aire de enfriamiento, por lo que se puede medir la temperatura a la cual ingresa el aire a los ventiladores con la ayuda de un higrómetro.



Foto 17. Punto de muestreo N°11: Salida del aire residual limpio

Fuente: El autor

En el punto 11: Este punto se ubica en la chimenea por donde salen los aires residuales que no son usados por el quemador del horno. Se hace una medida de la presión estática, dinámica y de temperatura de los aires, para obtener los aires residuales que abandonan el sistema. Para esto se necesitará de los tubos de pitot, junto con los pares de termocuplas. Para estas mediciones se espera a que los datos se estabilicen y luego se toman por lo menos cuatro datos de manera que luego se pueda hacer un promedio de estos y determinar así los valores que se vayan a usar en el cálculo del balance.



Fotos 18, 19, 20, 21 y 22. Punto de muestreo N°12: Paredes del enfriador

Fuente: El autor

Punto 12: Este es el punto de muestreo para las temperaturas superficiales del enfriador. En este punto, para la toma de muestras se toma mínimo una medida de temperatura en cada pared del enfriador. Debido a la accesibilidad se hicieron 2 medidas en cada pared del enfriador y se realizó una medición más cerca de la salida del material del horno. De todas estas 13 mediciones se obtendrá un promedio y el resultado servirá como temperatura general de las paredes del enfriador.



Fotos 23, 24 y 25. Punto de muestreo N°13: Zona de medición para el polvo de crudo recuperado por el filtro del sistema molino de crudo-horno

Fuente: El autor

Punto 13: Aquí se mide parte de la cantidad de polvo de crudo que ha sido arrastrado por la corriente de gases de salida. Para esta toma de datos se necesita de un camión que se quede estacionado para que se recolecte el polvo que sale de este filtro y habiendo conocido el peso de este camión, se lo lleva a pesar en las básculas ubicadas a la salida de la planta. Conocido el peso obtenido de polvo recuperado del filtro, se puede determinar, en relación al caudal de alimentación de crudo que se alimenta al horno, el caudal másico de retorno o recirculación de polvo crudo que se produce desde el pre-calentador y que determina el grado de eficiencia del pre-calentador y nos sirve para el correcto cálculo de la producción horaria efectiva de clinker que produce el horno rotativo.



Fotos 26 y 27. Punto de muestreo N°14: Zona de medición para el polvo de crudo recuperado en la torre de enfriamiento del sistema molino de crudo-horno

Fuente: El autor

Punto 14: En este punto se obtiene el resto de polvo de crudo que fue arrastrado por la corriente de gases de salida del pre-calentador y que se recoge en la torre de enfriamiento cuando el molino de crudo no se encuentra en operación y los gases calientes con polvo son previamente enfriados y forzados a ir directamente hacia el filtro de mangas. El proceso es parecido al anterior, con la excepción de que se recolecta el polvo con una carretilla, debido a que el lugar donde se encuentra no permite el acceso de un camión, es decir se puede realizar un pesaje en cantidad de polvo de crudo recuperado en ésta parte del sistema y sumarlo al polvo que se recoge en el filtro del molino de crudo para fines de los cálculos del balance másico.



Fotos 26. Punto de muestreo N°15: Zona en la que se determina la cantidad de polvo de clinker recuperado por el filtro (F25) del enfriador.

Fuente: El autor

Punto 15: Aquí podemos determinar y pesar la cantidad de polvo de clinker que se recupera del sistema del enfriador y que es el total de polvo arrastrado junto con el aire residual que proviene y se evacúa ya limpio por la chimenea del enfriador.



Foto 27. Punto de muestreo N°16: Zona de salida del clinker al hall de almacenamiento

Fuente: El autor

Punto 16: Para obtener el peso de clinker producido por hora es necesario separar en un espacio controlado dentro del hall de almacenamiento todo el clinker, de manera que, el día en que se realiza el balance, podamos cargar el mismo sobre camiones y se proceda a pesar en la báscula camionera que posee la empresa la producción obtenida de por lo menos 8 horas continuas de producción del horno. Así podemos estimar con mucha precisión la producción promedio horaria del clinker y que nos servirá para el cálculo final del rendimiento térmico del horno en relación con el combustible utilizado en el período de tiempo aplicado.

Descripción de la toma de datos en la planta

Antes de realizar la toma de datos en planta, se debe tener presente que se trata de realizar un balance de masa y energía, dentro de los límites de control determinados para el sistema del horno, por lo que, todos los datos deben medirse o registrarse cuando la producción del horno sea constante y el horno esté operando en condiciones normales de mayor equilibrio posible, es decir, no existan fluctuaciones importantes en el ratio de alimentación de crudo, combustible, presiones, temperaturas y velocidades de flujo en el sistema y durante el período de tiempo planificado para realizar las mediciones y toma de datos de un balance.

Temperatura del crudo al ingreso del sistema: En cuanto a la temperatura a la cual ingresa el crudo al pre-calentador, podría ser considerada constante de acuerdo a la bibliografía, y los resultados de varias mediciones de este dato, que se mostrarán en la sección “Resultados” muestran que su diferencia es de solo decimales, por lo que su medida casi no presenta variaciones significativas.

Temperaturas de las paredes del pre-calentador y del enfriador: Debido a que las temperaturas de las superficies del pre-calentador y del enfriador, no varían demasiado según la bibliografía, se pueden tomar estas medidas en un día diferente a la toma de muestras en general, debido a que esta toma de datos puede ser demasiado demorada.



Presión manométrica del aire primario: La presión manométrica del aire que ingresa como aire primario, permanece casi inalterable durante un turno de un operador, por lo que esta solo cambia si es que los panelistas lo disponen así, así que basta con medirlo una vez en un turno para tener el valor de este dato. Para esto basta con revisar el valor que está siendo indicado por el manómetro colocado en este sitio.

Polvo de crudo arrastrado por los gases del pre-calentador: En cuanto a la cantidad de polvo que sale del pre-calentador, se puede pesar cuanto de material egresa en una determinada cantidad de tiempo. Lo que se busca es que se haga al menos 2 veces por turno de ocho horas, pero en la práctica esto no se puede siempre realizar, debido a que supone que un camión se mantenga inmóvil por cerca de una hora y a personal que ayude en esta tarea. Pero en lugar de esto lo que se puede hacer es que el camión, primero sea pesado para que luego se quede esperando durante 30 minutos a que salga el polvo del filtro (teniendo ese tiempo la alimentación del crudo constante) y luego volver a pesar el camión con el crudo, para que al restar estos dos valores se obtenga el peso de crudo obtenido de este filtro. Además, sabiendo que este no es el único polvo crudo que es arrastrado en el proceso, se obtiene también el polvo crudo que se queda en la torre de enfriamiento, lo que se hace es que el tornillo de esta torre pare y se lo haga ahora girar en sentido inverso, de manera que se pueda sacar por la parte de abajo el polvo que es recolectado por este tornillo. Para que el dato obtenido sea lo más real posible lo primero que se debe hacer es limpiar el ducto por el que caerán los polvos, debido a que allí se ha acumulado polvos de crudo previos a la medición. Aquí se recomienda realizar una medida del polvo durante 15 minutos, pero el volumen que permite una carretilla, impide este propósito, por lo que solo se toma este peso por 5 minutos. Luego, los pesos obtenidos en estos tiempos de recolección, son transformados a pesos por hora, se suman y con ellos se obtiene un porcentaje respecto a la alimentación.

Clinker obtenido en el filtro de mangas F25 y del Enfriador: Para determinar la producción real de clinker producido en el horno durante el día que se realiza el balance, se debe pesar el clinker separado en el hall de almacenamiento y también pesar o estimar mediante un debít la cantidad de polvo de clinker que se recupera en el filtro de mangas del enfriador y sumar ésta cantidad de polvo de clinker al cálculo de la producción real del horno en el período planificado para el balance. A continuación se describe el método de pesaje del clinker:

Para el pesaje del clinker en los filtros, primero se debe pesar el camión para obtener la tara del mismo, para luego colocarlo en la salida de la manga y recoger el polvo en el camión por lo menos en un tiempo de dos horas y proceder a pesarlo en la báscula camionera.



Para el pesaje del clinker almacenado en el Hall, utilizando el puente grúa se procede al carguío del clinker en camiones pesando en la báscula camionera su contenido en un período de tiempo no menor a ocho horas de producción continua del horno en el día que se realiza el balance.

Como se mencionó anteriormente, la producción de clinker real pesada en báscula se suele relacionar con el total de crudo alimentado al horno o utilizado en el período de tiempo planificado para el cálculo del balance, obteniendo, de esta manera el factor de transformación de crudo-clinker que nos servirá en el cálculo definitivo.

Presión estática y dinámica de los gases de salida del pre-calentador: Otro dato importante de medir sería el de la medición de los parámetros de los gases de salida, la temperatura a la cual sale y cuanto sale (para esto se necesitará de la presión dinámica y de su presión estática). Para conocer la densidad a la que se encuentra, se necesitaría de una temperatura en este punto, para lo cual se puede hacer uso de una termocupla en este punto, o se puede usar la temperatura que indica el panel, para este dato. En cuanto a los valores de presiones estáticas y dinámicas son valores que varían demasiado, por lo que al momento de tomar los datos se debe ser muy precavido al considerar que una presión ha llegado ya al equilibrio, y se debe tener presente que el pitot, debido a estar tomando medidas de un fluido con polvos, puede fácilmente taponarse y por ende dar valores erróneos.

Composición de los gases de salida del pre-calentador: Este dato debería ser medido en el mismo lugar de donde se tomaron los datos de presión estática y dinámica en el downcomer, sin embargo, debido a que el equipo no posee una bomba lo suficientemente fuerte para obtener el fluido y analizar los gases, se debe tomar estos datos en otro punto de muestreo, luego del F4A. Para esto se toma el Testo, y se lo coloca en la toma de muestras y luego de obtenido los valores de composición de los gases, se puede ya retirar el aparato y apagarlo posterior a su retiro.

Presión estática, dinámica y temperatura de los aires a la salida del ventilador F27: Este es uno de los puntos, más difíciles, en los cuales se debe realizar la toma de datos, debido a la altura a la que se encuentra. La forma de medir las presiones dinámica y estática se indican en el manual de operación del equipo de tubo de Pitot. En cuanto a la temperatura a la que se encuentra la chimenea se debe utilizar una termocupla, debido a que este dato no se lo halla en el panel.

Temperatura del Clinker a la salida del enfriador: Para tomar esta medida nos ayudamos del pirómetro óptico. Se deberían medir las temperaturas y obtener un



valor promedio, pero cuando se toman datos en la práctica, se nota que el flujo de material no es constante (la mayor parte del tiempo), y además el material cae rápidamente, por lo que se debe tomar el valor que registre el pirómetro en un tiempo determinado, para obtener este valor.

Temperatura del aire primario y del aire de enfriamiento: Para tomar esta medida, se usará un higrómetro, para lo cual solo se debe permanecer unos segundos con el higrómetro encendido en el punto donde se quieren medir estos valores. Debido a que los valores son muy parecidos (como se verá en resultados), se hace un promedio entre estos valores para tener un solo dato de temperatura.

Velocidad del viento: Para medir este parámetro, lo más recomendable es usar un aerómetro para medir este factor, pero no se dispone de este aparato en la fábrica, por lo que se lo registra con los valores que son dados por Meteored en internet. Aunque, la velocidad del viento no suele superar los 11 km/h.

Temperaturas a lo largo del horno: Para tomar las temperaturas a lo largo del horno, no se ha establecido un punto de muestreo, sin embargo en esta parte del documento se aclara que no se puede tomar todas las temperaturas a lo largo del horno, pero si se puede tomar mediciones de temperatura a distintas distancias del horno, para luego obtener un promedio de estas y utilizar el valor para el cálculo. Estas distancias a las que se ha tomado la temperatura son las siguientes: a 0 m, a 8 m, a 18 m a 25.5 m, a 27 m, a 47 m y a 57 m. Estas pueden ser tomadas desde el panel (preferiblemente desde la vista del horno en 3 dimensiones, porque en la gráfica con temperaturas no se puede distinguir tan precisamente los valores como se lo hace con los valores en esta vista) o desde el mismo horno, debido a que a lo largo de este la empresa cuenta con señalamiento de las distancias desde la salida del horno hasta la entrada de este.

2.4. Equipos a utilizar

Para realizar la obtención de estos datos de la planta, se necesita de varios equipos, cada uno de los cuales cumple una tarea en específico, a continuación se realizará una pequeña descripción de los equipos utilizados y las funciones que realizan. En el Anexo I de este documento se muestran dichos equipos.

1) Tubos de Pitot

Los tubos de pitot están controlados por un manómetro electrónico de marca PCE, cuyo modelo es: PFM2

De esta manera este instrumento ayuda a medir tres cosas en el punto de toma de datos: la velocidad de los gases, la presión estática dentro de la tubería y la



presión dinámica e incluso si dentro del instrumento se introduce el diámetro de la tubería el aparato daría el flujo volumétrico dentro de ésta.

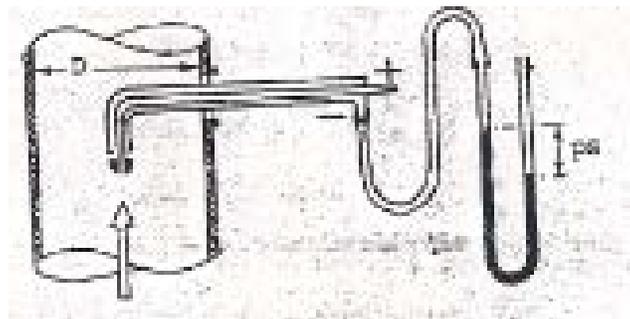
Para ocupar este instrumento, se necesita del tubo de pitot en S de 2 bocas de sentidos contrarios, (si se trata de un gas con polvos) o de un tubo de pitot en un solo sentido en forma de L (para caso de gases sin polvo), de unos tubos flexibles que se conectan entre el tubo de pitot y el aparato medidor, en este caso en el que se ocupa dentro de la empresa se trata de un tubo blanco que es conectado por la parte positiva y de uno negro que es conectado en la parte negativa.

Para ocupar este aparato, se debe tener presente que los lugares en los que se necesitan tomar los datos de velocidad, presión son lugares de altas temperaturas y los gases pueden tener polvos que pueden afectar la salud, por lo que se debe tener el equipo de protección necesario para la toma de datos, entre esto se destaca que deben usarse mascarillas y guantes, además que por el ruido que provocan equipos cercanos a estos lugares es preferible usar audífonos.

En el manómetro electrónico se debe seleccionar si se quiere medir velocidad, presión o flujo y luego se debe encender el aparato cuando aún se encuentra fuera de la tubería.

Al momento de obtener los datos en los lugares que sea necesario, se debe primero desatornillar y destapar con cuidado las tapas de las tomas de datos; para esto también es necesario equiparse de unas llaves inglesas.

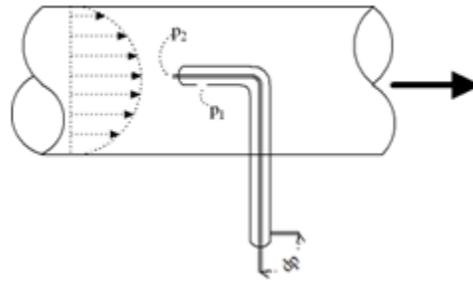
Al momento de medir la presión, se puede realizar de varias maneras y obtener varios tipos de presión. Por ejemplo, para obtener la presión estática, se puede hacer, desconectando el lado de la presión total y ver la medición que da el aparato, de acuerdo a lo mostrado en la siguiente figura:



Gráfica N°6: Método de uso del tubo de Pitot en una tubería para la obtención de la presión estática

Fuente: Manual de FLSmith

O se puede obtener la presión dinámica (que resulta de la diferencia entre la presión total y la estática), manteniendo ambos cables conectados al aparato:



Gráfica N°7: Método de uso del tubo de Pitot en una tubería para la obtención de la presión dinámica

Fuente: http://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d_612.html, modificada por el autor

Al abrir estas tapas se debe tener cuidado con el polvo que salen de estas tuberías. Para asegurarse de tomar datos de una manera correcta se pone los huecos de los tubos dentro de las tuberías, de manera que los gases choquen de lleno con uno de estos orificios de los tubos de pitot. Luego, para que los datos obtenidos den la mayor confiabilidad posible se vuelve a cerrar la tapa del agujero recién abierto lo más posible sin que aplaste al tubo de pitot y luego se cierran los agujeros mediante franelas o trapos y una vez hecho esto se puede tomar el dato que se ha seleccionado medir, entre los antes mencionados.

Para esto se toman cerca de 4 datos representativos y se obtiene un promedio; 2 en la parte media de la tubería y otras 2 en las partes cercana a la tubería.

Al momento de aplicar la fórmula para hallar la velocidad con la que el flujo recorre la tubería se usa la fórmula que se dará más adelante en este documento, pero ésta fórmula tendrá un factor de corrección k , el cual tendrá un valor dado por:

Tabla 9

Especificación para las constantes del tubo de pitot

Tipo	Constante k
L	1
S	0,85

2) Pirómetro óptico

El pirómetro es de marca Fluke y puede aceptar temperaturas entre -30°C a 500°C .

Éste aparato ayuda a obtener las temperaturas en las superficies en las cuales se realizan la toma de datos.



Para usar el pirómetro óptico, uno debe igualmente cuidarse de las altas temperaturas que se encuentran en los lugares en los que se deben realizar las mediciones, por lo que el uso de guantes para protegerse del calor es obligatorio.

Al momento de usarlo simplemente se debe estar a una distancia prudencial del lugar donde se deba analizar la temperatura (tal vez a 1,5 m de distancia) y apuntar por un momento al objetivo (donde se verá un punto rojo), el tiempo que se crea necesario para obtener datos que sean reales (cerca de 1 minuto, para que los datos se estabilicen). Así mismo se toman 4 datos representativos y se obtiene un promedio.

3) *Higrómetro*

Este aparato ayuda a determinar la humedad y temperatura del ambiente. Para su uso simplemente se lo prende y dará la temperatura de donde uno se encuentre. De la misma manera que los anteriores aparatos se obtiene un promedio de 4 datos significativos.

4) *Testo*

Este aparato electrónico ayuda a dar la composición, temperatura y presión de los gases en una tubería. Las indicaciones básicas para las medidas de seguridad son las mismas que las ya explicadas para el manómetro electrónico y los tubos de pitot.

Al momento de obtener los datos se debe primero localizar los puntos que permiten realizar el muestreo con este aparato. Una vez hecho esto, se conecta el Testo con la bomba de este aparato y una vez conectado se mete el tubo en el punto de muestreo y el display de este aparato mostrará cómo va variando la composición de los gases en el punto en el que se realiza la toma de datos. Para esto debe asegurarse de que los valores que se estén observando se hayan estabilizado.

Como hay 2 posibilidades a la hora de tomar estos datos a continuación se explica la forma de realizar las mediciones en cada una de estas situaciones:

La primera es con un punto de muestreo localizado en el lugar, para esto se toma el testo, se lo conecta con la bomba en la parte inferior de este y se gira el seguro indicado para que el tubo no se salga ni permita entradas de aire o salidas de los gases, luego se pone un adaptador a la punta libre de la bomba, para luego conectar una manguera y esta llevarla al punto de muestreo.

La segunda situación posible es que el sitio donde se realice el muestreo no tenga una tubería para el muestreo, en este caso lo que se hace es conectar la bomba al



testo igual que antes, pero ahora esta bomba se la conecta a la parte lateral del tubo y el cable de este tubo se conectará con el testo en otra entrada (también en la parte inferior de este aparato), para que finalmente el tubo ingrese a la tubería donde ha de medir la composición de los gases. La tubería, debe tener, así mismo, una tapa por la que ingresa este tubo, pero para evitar errores en la medición de éste, se usa un trozo de lana de vidrio para evitar que el gas escape.

El testo permite además la adaptación a este de una termocupla, en caso de que sea necesario, como es el caso para la medición de las temperaturas que egresan del sistema en los aires residuales.

Este aparato permite guardar dentro de la memoria de este los resultados obtenidos en el muestreo. Para esto se toman cerca de 4 datos representativos y se obtiene un promedio.

2.5. Cálculos de los balances de masa

Para el cálculo de masas se deben obtener ciertos datos provenientes de la planta debiendo realizarse en algunos cálculos las transformaciones de unidades y a condiciones normales de presión y temperatura en el caso de los caudales másicos; algunas de estas unidades de interés se encuentran en el Anexo II.

Para describir los cálculos que son necesarios, se definirá cada uno de los datos necesarios para cada uno de los flujos que ingresan y egresan del sistema.

Flujos de entrada de masa

Agua en el crudo: Para obtener el agua en el crudo se necesitará de los siguientes datos:

Tabla 10

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del agua en el crudo

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo	kg/h
hum	Humedad del crudo	%

Entonces, para el cálculo de este parámetro se usa la siguiente fórmula:

$$m_{humedad} = m_{alim} \times \frac{hum}{100}$$

De donde:

$m_{humedad}$: Caudal másico de agua contenida en el crudo en kg/h



Crudo seco: Para obtener este dato se necesita de los mismos datos que para el parámetro anterior:

Tabla 11

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del crudo seco

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo	kg/h
hum	Humedad del crudo	%

Y para su cálculo, se usa la fórmula:

$$m_{crudo\ seco} = m_{alim} - m_{alim} \times \frac{hum}{100}$$

De donde:

$m_{crudo\ seco}$: Caudal másico de alimentación de crudo sin agua (crudo seco) en kg/h

O se puede usar el dato obtenido anteriormente:

$$m_{crudo\ seco} = m_{alim} - m_{humedad}$$

Combustible: Este dato se puede obtener directamente:

Tabla 12

Simbología de la masa de combustible

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{comb}	Caudal másico de combustible	kg/h

Aire de enfriamiento: Este aire, puede ser obtenido mediante los siguientes datos:



Tabla 13

Simbología de los datos necesarios para el cálculo del aire de enfriamiento

Símbolo	Parámetro	Unidades
Q_{F17}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F17	m^3/h
Q_{F18}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F18	m^3/h
Q_{F19}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F19	m^3/h
Q_{F20}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F20	m^3/h
Q_{F21}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F21	m^3/h
P_{F17A}	Presión del aire de enfriamiento en el F17 en cámara A	mbar
P_{F17B}	Presión del aire de enfriamiento en el F17 en cámara B	mbar
P_{F18A}	Presión del aire de enfriamiento en el F18 en cámara A	mbar
P_{F18B}	Presión del aire de enfriamiento en el F18 en cámara B	mbar
P_{F19}	Presión del aire de enfriamiento en el F19	mbar
P_{F20}	Presión del aire de enfriamiento en el F20	mbar
P_{F21}	Presión del aire de enfriamiento en el F21	mbar
T_{aea1}	Temperaturas del aire de enfriamiento y del aire primario	$^{\circ}C$

Estos datos obtenidos de caudal volumétrico que ingresa al sistema, es el caudal real, entonces, lo que se necesita es colocar estos datos en condiciones normales, para poder obtener la masa de aire que realmente ingresa al sistema, para esto se puede usar la ley general de los gases ideales que nos expresa la siguiente fórmula:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0}$$

De donde:

P: Presión en las condiciones consideradas

V: Volumen en las condiciones consideradas

T: Temperatura en las condiciones consideradas

P: Presión en condiciones normales

V: Volumen en condiciones normales

T: Temperatura en condiciones normales

Fórmula en la cual se considera las temperaturas en Kelvin y las unidades de presión deben ser las mismas.

Y a partir de ésta fórmula, se puede despejar el volumen en condiciones normales:



$$V_o = V \left(\frac{T_0}{T} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

Recordando que las condiciones normales son las de una presión de una atmósfera y temperatura de 273 K (0°C).

Antes de aplicar esta fórmula se debe recordar que la presión aquí mostrada es la presión total y que la presión de la que se dispone es manométrica; entonces:

$$P_T = P_m + P_b$$

Siendo:

P_T : Presión total

P_m : Presión manométrica

P_b : Presión barométrica

La presión barométrica a utilizar en los cálculos de los balances será de 556,65 mm Hg, correspondiente a la altura de la ciudad de Azogues, en la que se encuentra ubicada la planta. Para revisar los cálculos en los que se obtiene este valor, se puede ver en el Anexo III.

Y según esto se puede obtener ya la presión a la cual se encuentran sometidos los gases y hacer las correcciones para estas condiciones. Luego de esto se pueden sumar todos los caudales de aire que ingresaron por estos ventiladores para obtener el caudal volumétrico total de aire que ingresa para el enfriamiento.

$$Q_{o \text{ enfriamiento}} = Q_{o F17} + Q_{o F18} + Q_{o F19} + Q_{o F20} + Q_{o F21}$$

De donde:

$Q_{o \text{ enfriamiento}}$: Caudal volumétrico del aire de enfriamiento en condiciones normales en m³/h

$Q_{o F17}$: Caudal volumétrico del aire de enfriamiento proveniente del ventilador F17 en condiciones normales en m³/h

$Q_{o F18}$: Caudal volumétrico del aire de enfriamiento proveniente del ventilador F18 en condiciones normales en m³/h

$Q_{o F19}$: Caudal volumétrico del aire de enfriamiento proveniente del ventilador F19 en condiciones normales en m³/h

$Q_{o F20}$: Caudal volumétrico del aire de enfriamiento proveniente del ventilador F18 en condiciones normales en m³/h



$Q_{o F20}$: Caudal volumétrico del aire de enfriamiento proveniente del ventilador F18 en condiciones normales en m^3/h

Además hay que recordar que el gas que se está considerando es el aire y éste en condiciones normales tiene una densidad de $1,2929 \text{ kg}/m^3$ (ver anexo II) y entonces con el caudal volumétrico en condiciones normales obtenido se multiplica por esta densidad, de acuerdo a la fórmula:

$$m_{\text{aire enf}} = Q_{o \text{ enfriamiento}} \times \rho_0$$

$$m_{\text{aire enf}} = Q_{o \text{ enfriamiento}} \times 1,2929$$

De donde:

$m_{\text{aire enf}}$: Caudal másico del aire de enfriamiento

Aire primario: Para la obtención de este dato se necesita de:

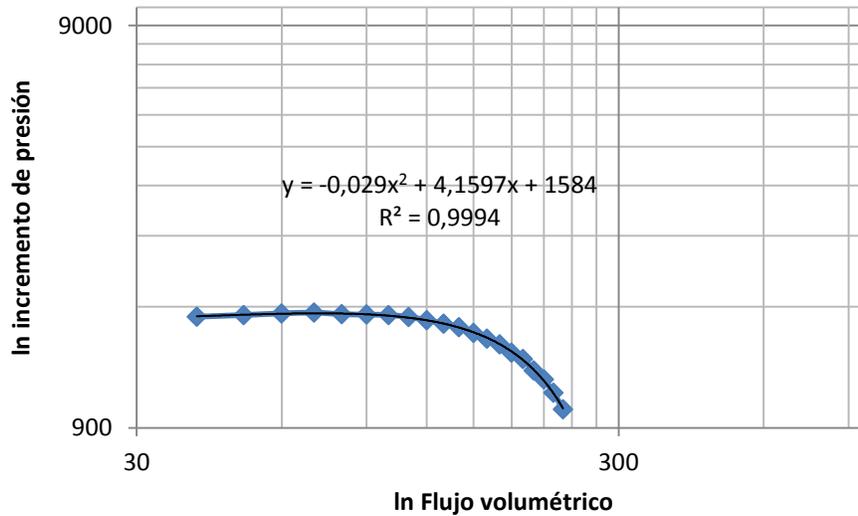
Tabla 14

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del caudal másico del aire primario

Símbolo	Parámetro	Unidad
$P_{\text{aire primario}}$	Presión manométrica del aire primario	mbar

Lastimosamente, este valor no puede ser encontrado de una manera directa, debido a que no se tiene un punto de muestreo para este, pero de acuerdo a la gráfica vista en el Anexo IV, podemos encontrar el valor de la velocidad del aire primario con su presión estática.

Y de estos datos se consigue una gráfica, la cual es:



Gráfica N°8: Gráfica para obtención de ecuación para el aire primario

Fuente: Gráfica realizada por Pedro Zhindón a partir de la Gráfica del Anexo IV

De donde, como se ve la curva tiene una tendencia polinómica, que se adapta muy bien a la fórmula mostrada.

Para ingresar la fórmula al programa necesitaba de y , por lo que necesitaba despejar la fórmula para poder ocuparla. Lo ahora mencionado lo describo a continuación:

$$y = -0,029x^2 + 4,1597x + 1584$$

Donde “ x ” representará el flujo volumétrico y “ y ” la presión, por lo que podemos decir:

$$-P_{\text{aire primario}} = 0,029x^2 - 4,1597x - 1584$$

$$\frac{1584 - P_{\text{aire primario}}}{0,029} = x^2 - \frac{4,1597}{0,029}x$$

$$x^2 - 143,438x - \frac{1584 - P_{\text{aire primario}}}{0,029} = 0$$

De donde aplicando la fórmula para ecuaciones cuadráticas se tiene:



$$Q_{\text{Aire primario}} = \frac{143,438 \pm \sqrt{143,438^2 - 4 \left(-\frac{1584 - P_{\text{aire primario}}}{0,029} \right)}}{2}$$

Y como el resultado presentado en esta ecuación representa el flujo volumétrico de aire primario que ingresa en m³/min, se debe multiplicar por 60 para obtener el flujo volumétrico horario. Una vez hecho esto, se obtiene la masa de aire primario:

$$m_{\text{Aire primario}} = Q_{\text{Aire primario}} \times \rho$$

De donde:

$m_{\text{Aire primario}}$: Caudal másico del aire primario en kg/h

$Q_{\text{Aire primario}}$: Caudal volumétrico del aire primario en m³/min

ρ : Densidad del aire primario en condiciones actuales en kg/m³

Aires falsos: Este dato, es muy difícil de calcular, por lo que no se lo ha obtener de una manera directa, sino más bien, se lo calcula por diferencia entre el caudal másico de salida total y el caudal másico de entrada total (menos los aires falsos). Entonces lo que necesitamos para su cálculo es:

Tabla 15

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de aire falso (1)

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{esaf}	Caudal másico de entrada (sin aires falsos)	kg/h
m_s	Caudal másico de salida total	kg/h

Y su fórmula sería:

$$m_{\text{af}} = m_s - m_{\text{esaf}}$$

De donde:

m_{af} = Caudal másico de aires falsos en kg/h

O también se puede calcular mediante una fórmula que involucra los datos siguientes:

Tabla 16

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de aire falso (2)



Símbolo	Parámetro	Unidad
O_2 salida del pre-calentador	Porcentaje de oxígeno a la salida del pre-calentador	%
O_2 salida del pre-calentador	Porcentaje de oxígeno a la entrada del horno	%

Y se usa la fórmula:

$$x_{\text{Aire falso}} = \frac{O_2 \text{ salida del pre-calentador} - O_2 \text{ entrada del horno}}{21 - O_2 \text{ salida del pre-calentador}}$$

De donde:

$x_{\text{Aire falso}}$: Fracción de aire falso con respecto a los gases de salida del pre-calentador

Y se multiplica el resultado por el valor del caudal volumétrico de los gases de salida del pre-calentador y se obtiene el volumen de aires falsos que ingresan al sistema.

Flujos de salida de masa

Clinker: Este dato debería ser obtenido directamente, pero como en la empresa no se acostumbra medirlo normalmente, se recurre al factor crudo-clinker, para obtener el valor del flujo másico de clinker.

Tabla 17

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de Clinker obtenido

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo al sistema	kg/h
$F_{\text{c-kk}}$	Factor crudo Clinker	---

$$m_{\text{clinker}} = \frac{m_{\text{alim}}}{F_{\text{c-kk}}}$$

De donde:

m_{clinker} : Caudal másico de Clinker en kg/h

Aire residual: Los datos necesarios serían:

Tabla 18

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de aire residual



Símbolo	Parámetro	Unidad
$P_{din\ aire\ res}$	Presión dinámica del aire residual	mmH ₂ O
P_{sar}	Presión estática del aire residual	mmH ₂ O
T_{arch}	Temperatura del aire residual en la chimenea	°C

$$v_{aire\ res} = \sqrt{\frac{2gP_{din\ aire\ res}}{\rho}}$$

De donde:

$v_{aire\ res}$ = velocidad del aire residual en m/s
 g = gravedad en m/s²
 $P_{din\ aire\ res}$ = presión dinámica del aire residual
 ρ = densidad en kg/m³

De donde reemplazando la gravedad en la fórmula anterior:

$$v_{aire\ res} = 4,43\ k \sqrt{\frac{P_{din\ aire\ res}}{\rho}}$$

Luego se transforma a unidades horarias:

$$v_{aire\ res} = v_{aire\ res} \frac{m}{s} \times 3600 \frac{s}{h}$$

De donde la densidad es:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T_0}{T_{arch}} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

De donde:

ρ_0 : Densidad de aire en condiciones normales

ρ : Densidad del aire residual

T_0 : Temperatura en condiciones normales (273K)

T : Temperatura en condiciones de salida del aire residual

P : Presión total del aire en condiciones de salida del aire residual

P_0 : Presión en condiciones normales (1 atm)

Recordando que:

$$P_T = P_{sar} + P_b$$

Y finalmente la masa:

$$m_{aire\ res} = v_{aire\ res} \times \rho \times A_{chim}$$



De donde:

$m_{\text{aire res}}$: Caudal másico del aire residual

A_{chim} : Área de la chimenea del F27

ρ : Densidad del aire residual

Polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas: Este dato, puede ser obtenido nuevamente según un factor que relaciona este parámetro con el crudo que está siendo alimentado al sistema.

Tabla 19

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo al sistema	kg/h
$x_{\text{c-pkk}}$	Factor crudo-polvo de Clinker	

$$m_{\text{polvo de clinker}} = \frac{m_{\text{alim}}}{x_{\text{c-pkk}}}$$

De donde:

$m_{\text{polvo de clinker}}$: Caudal másico del polvo de clinker recuperado del filtro de mangas

Gases de salida del pre-calentador: Para este dato se va a necesitar de una medición directa en planta:

Tabla 20

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de gases de salida del pre-calentador

Símbolo	Parámetro	Unidad
T_{gs}	Temperatura de los gases de salida	°C
$P_{\text{din gas}}$	Presión dinámica de los gases de salida	mm H2O
$P_{\text{est gas}}$	Presión estática de los gases de salida	mm H2O
O_2	Porcentaje de O2 en los gases de salida	%
CO_2	Porcentaje de CO2 en los gases de salida	%
N_2	Porcentaje de N2 en los gases de salida	%



Los cálculos serían los mismos que los necesarios para el cálculo del aire residual; la única diferencia, sería el cálculo de la densidad del gas, debido a que no es un dato, que como los anteriores podamos simplemente obtener en una tabla dada, sino que esta va a depender de los datos de la composición de este fluido que fue puesta junto con los datos. Por lo tanto para calcular los valores de la densidad, se deberá primero obtener uno a uno los datos de densidad de cada compuesto del gas en condiciones normales, tal y como se muestra en el Anexo V.

Luego como se tiene la composición porcentual de cada uno de estos compuestos en los gases, se podría obtener la densidad de estos mediante la fórmula siguiente:

$$\rho = x_{CO2}\rho_{CO2} + x_{O2}\rho_{O2} + x_{N2}\rho_{N2}$$

Para luego corregir la densidad mediante la fórmula antes presentada y realizar todo el procedimiento previamente indicado.

De hecho al obtener los valores de la composición de los gases de salida del precalentador, se puede obtener también la cantidad de NO, SO₂ y CO que se encuentran en dichos gases, pero su porcentaje es tan bajo, que afecta la densidad de esta de una manera casi imperceptible. Es por esta razón que para la aplicación de la herramienta trabajamos solo con estos datos y no con el resto de datos de la composición, porque en una herramienta lo más recomendable es que exista el ingreso de la menor cantidad de datos posibles, para hacer el proceso de obtención de resultados más simple.

Polvo de crudo recuperado del colector de polvos y la torre de enfriamiento: Así mismo este dato, puede ser obtenido directamente como un porcentaje respecto a la alimentación.

Tabla 21

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de polvo recuperado del colector de polvos y la torre de enfriamiento

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de crudo alimentado al sistema	kg/h
$x_{polvo\ de\ clinker}$	Fracción de polvos de crudo recuperado	

$$m_{polvo\ recuperado} = m_{alim} \times x_{polvo\ de\ crudo}$$

De donde:



$m_{\text{polvo de clinker}}$: Caudal másico del polvo de clinker recuperado del filtro de mangas

2.6. Cálculos de los balances de energía

Para describir los cálculos que serán necesarios, se ha de definir cada uno de los datos para cada flujo que ingresa y egresa del sistema, al igual que se hizo con el balance másico.

Corrientes de entrada de energía

Calor sensible de la alimentación del crudo seco: Para este cálculo se requiere de estos datos:

Tabla 22

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible de la alimentación del crudo seco

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{\text{crudo seco}}$	Caudal másico de crudo seco alimentado al sistema	kg/h
T_{crudo}	Temperatura del crudo alimentado al sistema	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

De donde se calcula el calor sensible que es aportado por el crudo mediante la fórmula del calor que dice:

$$q_{\text{crudo seco}} = m_{\text{crudo seco}} \times cp_{\text{crudo}} \times \Delta T \quad \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$$

De donde:

$q_{\text{crudo seco}}$: Calor sensible del crudo seco

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

cp_{crudo} : Calor específico del crudo

Y:

$$\Delta T = T_{\text{crudo}} - T_{\text{amb}}$$

Y para hallar el calor específico, se describe a continuación la fórmula descrita por el Ing. Percy Castillo:

$$cp_{\text{crudo}} = 0,21 + 0,00007 \times \left(\frac{T_{\text{crudo}} + T_{\text{amb}}}{2} \right)$$



Calor sensible del combustible: Los cálculos usados para esta determinación, son iguales a los anteriores y se necesitan estos datos:

Tabla 23

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del combustible

Símbolo	Parámetro	Método de obtención del dato
m_{comb}	Caudal másico de combustible	Dato de panel de control
T_{comb}	Temperatura del combustible	Medición directa en la planta
T_{amb}	Temperatura ambiente	Medición directa en la planta

La fórmula para el calor es:

$$q_{comb} = m_{comb} \times cp_{comb} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

q_{comb} : Calor sensible del combustible en Kcal/h

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

cp_{comb} : Calor específico del combustible

Y:

$$\Delta T = T_{comb} - T_{amb}$$

Y para hallar el calor específico, se describe a continuación la fórmula descrita en el Manual de Combustión y clinkerización de autoría del Ing. Percy Castillo:

$$cp_{comb} = 0,41 + 0,00043 \times \left(\frac{T_{comb} + T_{amb}}{2} \right)$$

Calor sensible del aire primario: Los cálculos usados para esta determinación, son iguales a los anteriores y se necesitan estos datos:



Tabla 24

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del aire primario

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{aire\ primario}$	Caudal másico del aire primario	kg/h
T_{ae1}	Temperatura del aire de enfriamiento y primario	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

La fórmula para el calor será:

$$q_{aire\ primario} = m_{aire\ primario} \times cp_{aire} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

$q_{aire\ primario}$: Calor sensible del aire primario

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

$cp_{aire\ enf\ 1}$: Calor específico del aire de enfriamiento y primario

Y:

$$\Delta T = T_{ae1} - T_{amb}$$

Y para hallar el calor específico, se describe a continuación la fórmula también descrita en el manual realizado por el Ing. Percy Castillo:

$$cp_{aire\ enf\ 1} = 0,247 + 4,4 \times 0,00001 \times \left(\frac{T_{ae1} + T_{amb}}{2} \right)$$

Calor sensible del aire de enfriamiento: Para el cálculo de este aire se necesita de los datos:

Tabla 25

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del aire de enfriamiento

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{aire\ de\ enfriamiento}$	Caudal másico del aire de enfriamiento	kg/h
T_{ae1}	Temperatura del aire de enfriamiento y primario	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C



La fórmula para el calor será:

$$q_{aire\ enf} = m_{aire\ de\ enfriamiento} \times cp_{aire\ enf\ 1} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

$q_{aire\ enf}$: Calor sensible del aire de enfriamiento en kcal/h

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

$cp_{aire\ enf\ 1}$: Calor específico del aire de enfriamiento y primario

Y:

$$\Delta T = T_{ae1} - T_{amb}$$

Calor de combustión: Este calor requiere de los siguientes parámetros:

Tabla 26

Simbología de las variables necesarias para el cálculo de la masa de gases de salida del pre-calentador

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{comb}	Caudal másico del combustible	kg/h
PCI	Poder calorífico inferior	kcal/kg

Y la fórmula requerida sería:

$$q_{combust} = m_{comb} \times PCI \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

$q_{combust}$: Calor de combustión

PCI: Poder calorífico inferior



Corrientes de salida

Calor sensible del Clinker: Los datos requeridos para este cálculo son:

Tabla 27

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del Clinker

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{clinker}$	Caudal másico del Clinker	kg/h
$T_{clinker}$	Temperatura del Clinker	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

La fórmula para el calor será:

$$q_{clinker} = m_{clinker} \times cp_{kk} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

$q_{clinker}$: Calor sensible del clinker

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

cp_{kk} : Calor específico del clinker

Y:

$$\Delta T = T_{clinker} - T_{amb}$$

De donde:

$T_{clinker}$: Temperatura del clinker en °C

T_{amb} : Temperatura ambiental (de referencia) en °C

Y para hallar el calor específico, se describe a continuación la fórmula descrita por el Ing. Percy Castillo en su manual:

$$cp_{kk} = 0,18 + 0,000071 \times \left(\frac{T_{clinker} + T_{amb}}{2} \right)$$

Calor de evaporación del agua del crudo: Se requiere de:

Tabla 28



Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor de evaporación del agua de crudo.

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{humedad}$	Caudal másico de agua en el crudo	kg/h

La fórmula para el calor será:

$$q_{evap} = m_{agua\ en\ crudo} \times h_{fg} \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

q_{evap} : Calor de evaporación del agua de crudo en Kcal/h

$m_{agua\ en\ crudo}$: Caudal másico de agua en el crudo en kg/h

h_{fg} : Entalpía de evaporación del agua

De donde:

Calor sensible del aire residual: Se necesita de los datos siguientes:

Tabla 29

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del aire residual

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{aire\ residual}$	Caudal másico del aire residual	kg/h
T_{ar}	Temperatura del aire residual	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

La fórmula para el calor es:

$$q_{aire\ residual} = m_{aire\ residual} \times cp_{aire\ res} \times \Delta T$$

De donde:

$q_{aire\ residual}$: Calor sensible del aire residual en kcal/h

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

$cp_{aire\ res}$: Calor específico del aire residual

Y:



$$\Delta T = T_{ar} - T_{amb}$$

De donde:

T_{ar} : Temperatura del aire residual °C

T_{amb} : Temperatura ambiental (de referencia) en

Y la fórmula para la obtención del calor específico es la misma que para el aire de enfriamiento y del primario, solo que ahora se toma en consideración la temperatura del aire residual a la salida del sistema y no la temperatura del aire de enfriamiento y primario.

$$c_{p_{aire\ res}} = 0,247 + 4,4 \times 0,00001 \times \left(\frac{T_{ae1} + T_{amb}}{2} \right)$$

Una cosa que se debe aclarar con respecto a esta temperatura, es que “tar” (temperatura del aire residual al salir del sistema) y “tarch” (temperatura del aire residual en la chimenea) no son las mismas. Lo que sucede es que, para medir el caudal que sale por la chimenea del F27, se debe tomar en cuenta las condiciones de presión y temperatura que se encuentran en ese momento y en ese lugar. Pero con la temperatura es distinto, porque a pesar de que el caudal de aire que egresa del sistema es el mismo hasta la chimenea, no lo es su temperatura, porque en el trayecto ya ha pasado por un intercambiador del calor (enfriador), antes de pasar por las mangas y llegar finalmente a la chimenea.

Calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas: Para esto se necesita de:

Tabla 30

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas

Símbolo	Parámetro	Unidad
$m_{clinker\ recuperado}$	Caudal másico del Clinker recuperado	kg/h
$T_{polvo\ kk}$	Temperatura del Clinker recuperado	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

La fórmula para el calor es:

$$q_{polvo\ kk} = m_{clinker\ recuperado} \times c_{p\ clinker} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$



De donde:

$q_{polvo\ kk}$: Calor sensible del polvo de clinker recuperado

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

$cp_{p\ clinker}$: Calor específico del polvo de clinker

Y:

$$\Delta T = T_{polvo\ kk} - T_{amb}$$

La fórmula para la obtención del calor específico es la misma que para el Clinker (porque a pesar de ser polvo no deja de ser Clinker).

$$cp_{p\ clinker} = 0,18 + 0,000071 \times \left(\frac{T_{polvo\ kk} + T_{amb}}{2} \right)$$

Calor sensible de gases de salida del pre-calentador: Para este cálculo se necesita:

Tabla 31

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible de los gases de salida del pre-calentador

Símbolo	Parámetro	Método de obtención del dato
$m_{gases\ de\ salida}$	Caudal másico de los gases de salida	kg/h
T_{gas}	Temperatura de los gases de salida	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

La fórmula para el calor es:

$$q_{gases\ de\ salida} = m_{gases\ de\ salida} \times cp_{gas} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

De donde:

$q_{gases\ de\ salida}$: Calor sensible de gases de salida del pre-calentador en Kcal/h

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

cp_{gas} : Calor específico de gases de salida del pre-calentador

Y:

$$\Delta T = T_{gas} - T_{amb}$$



Y de aquí decimos que la fórmula para la obtención del calor específico es, de acuerdo a lo indicado en el manual del Ing. Percy Castillo:

$$cp_{gas}=0,23 + 0,00005 \times \left(\frac{T_{gas}+T_{amb}}{2}\right)$$

Calor sensible del polvo de crudo recuperado del colector de polvos: Para esto ocupamos:

Tabla 32

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor sensible del polvo de crudo recuperado en el colector de polvos

Símbolo	Parámetro	Unidad
m_{polvo}	Caudal másico de polvos de crudo recuperado	kg/h
T_{polvo}	Temperatura de polvos de crudo recuperado	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C

La fórmula para el calor será:

$$q_{polvo} = m_{polvo} \times cp_{polvo} \times \Delta T \quad \left[\frac{kcal}{h}\right]$$

De donde:

q_{polvo} : Calor sensible del polvo de crudo recuperado

ΔT : Diferencial de temperatura en °C

cp_{polvo} : Calor específico del polvo de crudo recuperado

Y:

$$\Delta T = T_{polvo} - T_{amb}$$

Y para hallar el calor específico, se describe a continuación la fórmula descrita por el Ing. Percy Castillo:

$$cp_{polvo}=0,23 + 1,2E - 4 \times \left(\frac{t_{pp}+t_{amb}}{2}\right) - \frac{3,076}{273+\left(\frac{T_{polvo}+T_{amb}}{2}\right)}$$

Pérdidas por radiación: Para determinar este valor se usan estos valores:



Tabla 33

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor perdido por radiación

Símbolo	Parámetro	Método de obtención del dato
T_{e1A}	Temperatura de pared en la etapa 1 A	Medición directa en la planta
T_{e1B}	Temperatura en la etapa 1 B	Medición directa en la planta
T_{e2}	Temperatura en la etapa 2	Medición directa en la planta
T_{e3}	Temperatura en la etapa 3	Medición directa en la planta
T_{e4}	Temperatura en la etapa 4	Medición directa en la planta
T_h	Temperatura promedio en el horno	Datos del panel
T_{enf}	Temperatura promedio del enfriador	Medición directa en la planta
T_{amb}	Temperatura ambiente	Medición directa en la planta

Estos datos se aplican en la fórmula de Stephan Boltzman, la cual dice:

$$E = 4E-8 \times (T^4 - T_s^4) \epsilon \quad \left[\frac{kcal}{hm^2} \right]$$

De donde:

E: Energía de radiación

T: Temperatura de la superficie en kelvin

T_s : Temperatura de ambiente en kelvin

ϵ = Emisividad

El factor de emisividad a la cual se hace referencia en esta fórmula, se toma como un valor de 0,85 para superficies oxidadas y para superficies con cemento, por lo que este es el valor que se toman para realizar los cálculos, debido a que los equipos en esta planta ya tienen algunos años y la tendencia que tienen de llenarse de cemento, debido al entorno en el que se hallan.

Pero para que coincida con las unidades de todas las fórmulas antes expuestas se necesita multiplicar estos valores por el área de cada una de estas áreas. Entonces la fórmula antes expuesta quedaría:

$$q_{rad} = 4,8E - 8 \times (T^4 - T_{amb}^4) \epsilon \times A \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

Pérdidas por convección: Para esta corriente energética se requiere de varios datos:



Tabla 34

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor perdido por convección

Símbolo	Parámetro	Método de obtención del dato
T_{e1A}	Temperatura en la etapa 1 A	Medición directa en la planta
T_{e1B}	Temperatura en la etapa 1 B	Medición directa en la planta
T_{e2}	Temperatura en la etapa 2	Medición directa en la planta
T_{e3}	Temperatura en la etapa 3	Medición directa en la planta
T_{e4}	Temperatura en la etapa 4	Medición directa en la planta
T_h	Temperatura promedio en el horno	Datos del panel
T_{enf}	Temperatura promedio del enfriador	Medición directa en la planta
T_{amb}	Temperatura ambiente	Medición directa en la planta
A_{e1A}	Área de la etapa 1 A	Cálculo
A_{e1B}	Área de la etapa 1 B	Cálculo
A_{e2}	Área de la etapa 2	Cálculo
A_{e3}	Área de la etapa 3	Cálculo
A_{e4}	Área de la etapa 4	Cálculo
A_h	Área del horno	Cálculo
A_{enf}	Área del enfriador	Cálculo
v_v	Velocidad del viento	Dato obtenido de internet

Debido a que la velocidad del viento, es difícil de medir con exactitud, debido a que se debería estar en un lugar sin tanta interferencia que ofrecen los equipos para el paso del aire y de que en el suelo no se obtendría el valor real, se decidió obtener de internet, en donde se dan mediciones cada hora.

De acuerdo a la velocidad del viento a la que se encuentre sometido el sistema, se puede ocupar para el cálculo del calor de convección sugerido en el libro de FLSmith, que dice que si la velocidad del viento está por debajo de los 3m/s (11 km/h) se puede ocupar la siguiente fórmula:

$$q_c = 80,333 \left[\frac{T+T_s}{2} \right]^{-0,724} (T - T_s)^{1,333} \quad \left[\frac{kcal}{hm^2} \right]$$

De donde:

h_c : Factor de convección

T: temperatura superficial del equipo considerado (en kelvin)

T_s : Temperatura de referencia (en kelvin)



Y en caso de que esta velocidad sea mayor a la antes mencionada se ocuparía esta fórmula:

$$q_c = 28,03 \left[\frac{T+T_s}{2} \right]^{-0,351} v^{0,805} D^{-0,195} (T - T_s) \quad \left[\frac{kcal}{hm^2} \right]$$

De donde:

D: Diámetro promedio del equipo considerado

Según registros históricos, la velocidad del viento en la ciudad la mayoría del tiempo está por debajo de los 11 km/h por lo que, se ocupará, la mayor parte de las veces la primera fórmula, pero no por esto se debe descartar la segunda fórmula para el programa.

Luego de esto se puede calcular el calor perdido por convección en las unidades deseadas si se multiplica por el área en el equipo requerido mediante la fórmula:

$$q_{conv} = q_{conv} \times A \quad \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

Calor de reacción: Para obtener este valor se requieren los siguientes datos:

Tabla 35

Simbología de las variables necesarias para el cálculo del calor de reacción

Símbolo	Descripción de los datos	Método de obtención del dato
Al ₂ O ₃	Porcentaje de Al ₂ O ₃ en el Clinker	Dato del laboratorio
Fe ₂ O ₃	Porcentaje de Fe ₂ O ₃ en el Clinker	Dato del laboratorio
SiO ₂	Porcentaje de SiO ₂ en el Clinker	Dato del laboratorio
MgO	Porcentaje de MgO en el Clinker	Dato del laboratorio
CaO	Porcentaje de CaO en el Clinker	Dato del laboratorio

Y para su cálculo, se utilizará una fórmula que es dada por el Ing. Percy Castillo, la cual es:

$$q_{reacción} = 4,11 Al_2O_3 + 6,48 MgO + 7,646 CaO - 5,116 SiO_2 - 0,59 Fe_2O_3 \quad \left[\frac{kcal}{kg \text{ de clinker}} \right]$$

Que, como se ve, está en Kcal/kg de Clinker, entonces para obtener este dato en Kcal/h se necesitaría multiplicar por la cantidad de Clinker producido.



2.7. Método para la programación informática

Para la programación de la herramienta se usará del programa Matlab mediante su complemento de GUIDE y este a su vez se ayudará de Excel para guardar y cargar datos. El programa Matlab a utilizar es la versión Matlab 2.11.0 (R2010b).

Entonces, debido a que este programa tendrá varias funciones, se describirán a continuación las funciones de algunos de los comandos:

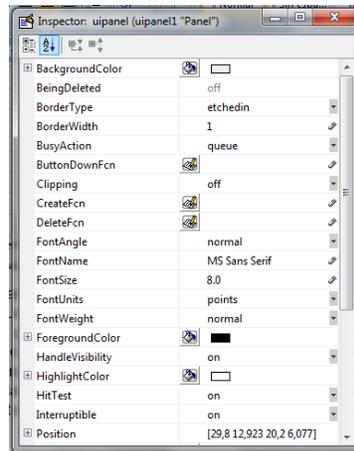
Tabla 36

Lista de comandos para Matlab GUIDE

Comando	Función
<i>Get</i>	Obtiene los datos escritos en una GUI o dentro de alguna de sus propiedades
<i>Set</i>	Escribe los datos de una variable en una GUI o cambia algunas de sus propiedades
<i>str2num</i>	Ayuda a transformar los valores obtenidos como string, a números
<i>Global</i>	Permite que las variables creadas en otras ventanas se lean en la ventana actual o que las variables creadas en la ventana actual se lean en otras ventanas. Esto se cumple siempre y cuando en ambas ventanas se ha escrito global y la variable.
<i>xlsread</i>	Permite a Matlab leer los datos escritos en un documento de Excel
<i>xlswrite</i>	Permite a Matlab escribir datos escritos en Matlab en un documento de Excel
<i>isempty</i>	Verifica si un botón se encuentra o no vacío, devolviendo valores de 1 si lo está y valores de 0 si no.
<i>Close</i>	Cierra la ventana actual
<i>movegui</i>	Mueve la guía a la posición indicada
<i>imread</i>	Carga una imagen
<i>Axis</i>	Activa o desactiva la escala cartesiana
<i>getframe</i>	Obtiene la imagen de la ventana abierta, como si se tratara de una película de la cual se obtiene una foto
<i>Date</i>	Da la fecha actual
<i>Cd</i>	Abreviatura de "Current direction" y cambia la dirección actual o la proporciona
<i>saveas</i>	Graba el archivo seleccionado en el formato que se especifique
<i>If</i>	Decide que hacer en caso de que una condición sea falsa o verdadera
<i>case is</i>	Decide qué hacer si se da alguno de las condiciones nombradas.
<i>For</i>	Repite un proceso un determinado número de veces.
<i>Break</i>	Termina la ejecución de una función while o for



Una vez que se ha iniciado una nueva área de trabajo con guide (o una existente) se notará que al lado derecho de la pantalla habrá un conjunto de botones, los cuales permitirán generar en el área de trabajo botones, paneles, edit text, static text, botones circulares, axes; etc. Para esto se selecciona el botón del que se necesite y se arrastra el cursor hasta que el objeto nombrado adquiera el tamaño requerido. Una vez obtenido el objeto se puede revisar sus propiedades de una manera muy sencilla al dar doble click sobre éste, o se puede dar un click derecho y poner "Property inspector". Entonces aparecerá una ventana parecida a esta:



Gráfica N°9: Ventana de Inspección de propiedades

Fuente: programa Matlab

Desde esta pantalla se pueden modificar las propiedades de cada objeto, como su color de fuente (ForegroundColor), color de fondo (BackgroundColor), tamaño (height y width), posición (position x y y), texto escrito en él (string en caso de botones, static text o edit text y title en caso de paneles), o incluso la manera en que se le nombra en las codificaciones (tag).

Al momento de escribir la codificación que se necesita para que el programa funcione de la manera que se requiera, debemos haber primero decidido cuándo va a ejecutarse esa función: si lo hará cuando presionemos con el mouse sobre ese botón, o si lo hará cuando se esté creando el objeto, o cuando éste esté siendo eliminado, o cuando este cambia (como en el caso de los popupmenus) o cuando se esté presionando un botón con el objeto seleccionado; etc.

Para esto se muestra la siguiente tabla, en la que se describe cuando se va a ejecutar cada codificación (solo las más importantes y las que más interesan para este proyecto):



Tabla 37

Tabla de formas de llamar a una codificación (callbacks)

Callback	Acción del usuario
ButtonDownFcn	El usuario da click en un borde de 5 pixeles del componente o figura
Callback	El usuario activa el componente, por ejemplo presionando un pushbutton
CloseRequestFcn	Se cierra la figura
CreatFcn	Se ejecuta cuando Matlab crea el objeto, pero antes de que se muestre
DeleteFcn	Se ejecuta justo antes de que Matlab borre una figura
KeyPressFcn	El usuario presiona una tecla cuando el cursor está sobre la figura
KeyReleaseFcn	El usuario deja de presionar una tecla cuando el cursor está sobre la figura

Fuente: http://www.mathworks.com/help/matlab/creating_guis/write_callbacks_using_the_programmatic_workflow.html

Para seleccionar el callback, se da un click derecho en la figura y se presiona view callbacks y se elige el callback que más convenga para la codificación que se planea realizar.

Otras acciones que serán necesarias para que el programa funcione serán descritas en el Anexo VI.



3. Resultados obtenidos

3.1. Poder calorífico del combustible Fuel oil #6 utilizado en la planta

Para obtener el poder calorífico inferior se necesita primero del poder calorífico superior, que se calcula mediante la fórmula:

$$PCI=PCS-597(9H+H_2O)$$

De donde:

PCI: Poder calorífico inferior

PCS: Poder calorífico superior

H: porcentaje de hidrógeno en el combustible

H₂O: Porcentaje de agua en el combustible

Para encontrar el poder calorífico superior del combustible, se utiliza una bomba calorimétrica. Desafortunadamente no existe una bomba calorimétrica dentro de la empresa UCEM, planta Guapán, razón por la cual no se puede realizar esta prueba dentro de la misma, en cambio, se debe que pedir ayuda de una institución que sí la tenga, como es el caso de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca, para realizar este ensayo. El equipo utilizado para realizar esta práctica es el calorímetro que posee la ya mencionada institución.



Fotos 28 y 29: Bomba calorimétrica y sus implementos

Fuente: El autor

El calorímetro de marca IKA, es del modelo C200 y las prácticas duraron aproximadamente 15 minutos.



Foto 30: Balanza analítica

Fuente: El autor

Además del calorímetro se necesita de una balanza analítica para el pesaje de la muestra. El método para el uso del equipo se describe en el Anexo VII del presente documento.

Al final de cada práctica se notaba como el combustible había sido reducido a solo cenizas.



Foto 30: Envase para depósito de muestras luego del ensayo

Fuente: El autor

Este experimento se realizó 2 veces en muestras del combustible usado en la empresa Guapán de semanas distintas. Los resultados obtenidos son descritos a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 38

Tabla de resultados de PCS con la bomba calorimétrica

Prueba	PCS
#1	9991,874
#2	9979,685
Promedio	9985,780

En donde el valor a usar de PCI va a ser de 9 426,391 kcal/kg (la obtención de este valor y de los datos obtenidos durante el uso de la bomba calorimétrica se muestran en el Anexo VIII)

3.2. Cálculo de áreas

3.2.1. Área de las paredes del horno

Para el cálculo del área del horno, se toma a este como si fuese un cilindro y se calcula su área:

$$A_{\text{horno}} = \pi D_{\text{horno}} L_{\text{horno}}$$

$$A_{\text{horno}} = \pi \times 4,179 \times 57,1$$

$$A_{\text{horno}} = 749,65 \text{ m}^2$$

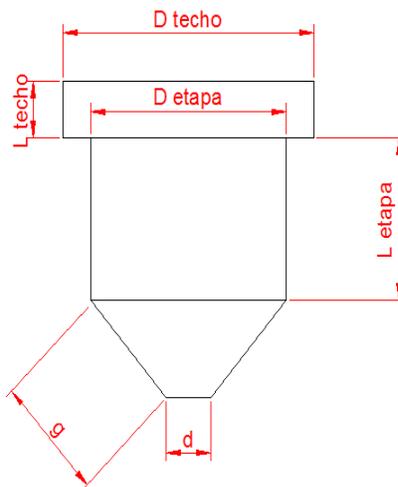
Para revisar los datos ocupados para este cálculo revisar Anexo IX.

3.2.2. Área de las paredes de las etapas del pre-calentador

Para el cálculo aproximado del área del pre-calentador, se toma a este como si fuese un conjunto de conos truncados y cilindros y se calcula su área:

$$A_E = \pi D_{\text{Etapa}} L_{\text{Etapa}} + \frac{\pi}{2} g (D + d) + \pi D_{\text{Techo}} L_{\text{Techo}} + \frac{\pi}{4} \times (D_{\text{Techo}}^2 - D_{\text{etapa}}^2) \quad [\text{m}^2]$$

De donde:



Gráfica N°10: Forma básica de estructura de un ciclón y la nomenclatura a ser usada para esta sección

Fuente: El autor

Las áreas calculadas para cada ciclón se resumen en la siguiente tabla:



Tabla 39

Tabla de resultados de Áreas de los ciclones del pre-calentador

Área de los ciclones del pre-calentador	Área en m ²
A_{E1A}	81,948
A_{E1B}	81,948
A_{E2}	105,754
A_{E3}	128,567
A_{E4}	122,536

Los datos para el cálculo de éstas áreas se pueden encontrar en el plano del pre-calentador mostrado en el Anexo X y Anexo XI (el primero muestra las medidas del pre-calentador, mientras que el segundo muestra las secciones en que éste es dividido para los cálculos que se mostrarán en la siguiente sección) .Y el desarrollo seguido para su cálculo se puede revisar en el Anexo XII.I.

3.2.3. Área de las paredes de los ductos del pre-calentador

Los resultados obtenidos para esta área se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 40

Tabla de resultados de Áreas de las paredes de los ductos del pre-calentador

Área de los ductos del pre-calentador	Área en m ²
A_{ductos}	585,612

Los cálculos para la obtención de este valor pueden ser revisados en el Anexo XII.II.

3.2.4. Área de las paredes del enfriador

Ahora, también se necesitara el área de la boca del horno y del enfriador, para esto se debería tomar a los planos del enfriador como referencia. Al igual que antes, para poder realizar el cálculo del área de este enfriador, se deberá dividir a este enfriador en secciones. En el Anexo XIII se muestran los planos del enfriador y en la sección XIV se muestran los cálculos del área del enfriador. El resultado obtenido se muestra a continuación:

$$A_{Enfriador}=238,798m^2$$



3.2.5. Área de la sección transversal de la chimenea del F27 y Downcomer

Área de la sección de la chimenea del F27

$$A_{chim} = \pi \frac{D_{F27}^2}{4}$$

De donde:

D_{F27} : Diámetro de la chimenea de la chimenea del enfriador

Y este valor es:

$$A_{chim} = \pi \frac{1,91^2}{4} = 2,865 \text{ m}^2$$

Área de la sección del ducto del Downcomer

$$A_{down} = \pi \frac{D_{down}^2}{4}$$

De donde:

D_{Down} : Diámetro del ducto del Downcomer

Y este valor es:

$$A_{chim} = \pi \frac{1,788^2}{4} = 2,511 \text{ m}^2$$

3.3. Cálculo de los diámetros

También será necesario calcular el diámetro de cada una de las etapas del pre-calentador y del enfriador. Para esto se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 41

Tabla de resultados de diámetros de los ciclones y ductos del pre-calentador y diámetro del enfriador

Diámetros de los ciclones del pre-calentador y ductos y diámetro del enfriador	Diámetro en m
D_{E1A}	2,574
D_{E1B}	2,574
D_{E2}	3,861
D_{E3}	3,999
D_{E4}	3,969
D_{ductos}	1,826
$D_{enfriador}$	4,438



Los cálculos de los diámetros antes indicados se muestran en el Anexo XV.

3.4. Valores obtenidos en la planta antes de los días de muestreo

Una semana de mediciones de las temperaturas superficiales de los ciclones y del enfriador arrojaron los resultados mostrados en el Anexo XVI y XVII, durante las fechas indicadas en las respectivas tablas.

De acuerdo a lo anterior se puede confirmar que estos valores de temperatura no varían mucho, debido a que estos datos se han mantenido muy cercanos entre sí a pesar de que esos días se tenían diferentes producciones de Clinker horario.

Ahora, con estos valores obtenidos, se puede definir un promedio de estos valores para usarlos en el balance:

Tabla 42

Temperaturas promedio de las cuatro etapas del pre-calentador y del enfriador

Etapas	15/12/2014	16/12/2014	17/12/2014	18/12/2014	19/12/2014	Promedio
1 A	122,000	123,750	124,300	125,150	124,000	123,840
1 B	129,325	133,875	132,525	133,100	130,750	131,915
2	90,888	90,513	89,100	88,250	89,613	89,673
3	117,675	122,313	123,425	123,063	125,013	122,298
4	159,513	161,600	162,988	163,100	163,800	162,200
Enfriador	84,715	84,946	84,315	85,100	85,392	84,894

Entonces, estos últimos valores, serán los que servirán para los cálculos del balance para los ciclones y el enfriador.

En cuanto a las temperaturas de los ductos del pre-calentador, también fue tomado durante una semana antes de que se realizaran las mediciones respectivas en el día especificado, y los resultados obtenidos son mostrados en el Anexo XVIII.

De acuerdo a los valores allí indicados, se tiene un promedio de temperatura en los ductos del pre-calentador, el cual es el siguiente:



Tabla 43

Temperatura promedio de los ductos en el pre-calentador

Fecha	Temperatura
16/12/2014	142,52
17/12/2014	144,572
18/12/2014	145,644
19/12/2014	143,7
Promedio	144,109

Ahora, con respecto a la temperatura del crudo que ingresa al sistema, también lo hace a una temperatura casi constante, de acuerdo a esto, podemos escribir los valores obtenidos en planta durante los días que se realizaron las mediciones de esto y conseguir un promedio de la temperatura de crudo que ingresa para usarlo en el balance.

Tabla 44

Temperatura promedio del crudo

Fecha	Temperatura del crudo (°C)
15/12/2014	47
16/12/2014	46,8
17/12/2014	47,1
18/12/2014	46,5
19/12/2014	47,6
Promedio	47

En cuanto al pesaje de polvo de crudo arrastrado con los gases del pre-calentador, y que posteriormente el proceso los vuelve a ingresar en el sistema, los resultados obtenidos son:

Peso del polvo del crudo en el tornillo de la torre de enfriamiento:



Tabla 45

Peso del polvo del crudo en el tornillo de la torre de enfriamiento

Descripción	Datos	
Fecha	30/12/2014	
Hora	11H00-11H05	
Peso de la carretilla sin polvo (tara)	0,5	kg
Peso de la carretilla con el polvo	40	kg
Polvo recuperado de la torre de enfriamiento	39,5	kg
Tiempo de toma de muestra	5	minutos

Fuente: Tabla obtenida por el departamento de Producción de la planta Guapán- UCEM y el autor

Pero tal como deja notar la tabla anterior, este es el peso que se obtiene al hacer las mediciones por solo 5 minutos, para tomar el valor a 1 hora, se debe realizar el siguiente cálculo:

$$\text{Peso del polvo del crudo en el tornillo de la torre de enfriamiento} = 39,5 \frac{\text{kg}}{5 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 474 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Peso del polvo del crudo en el filtro:

Tabla 46

Peso real del polvo del crudo en el filtro

Descripción	Datos	
Fecha	30/12/2014	
Hora	10H00-10H30	
Peso del camión sin polvo (tara)	13130	Kg
Peso del camión con el polvo	16340	Kg
Polvo recuperado de la torre de enfriamiento	3210	Kg
Tiempo de toma de muestra	30	Min

Fuente: Tabla obtenida por el departamento de Producción de la planta Guapán- UCEM y el autor

Pero tal como deja notar la tabla anterior, éste es el peso que se obtiene al hacer las mediciones por solo 30 minutos, para tomar el valor a 1 hora, se debe realizar el siguiente cálculo:

$$\text{Peso del polvo del crudo en el filtro} = 3210 \frac{\text{kg}}{30 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 6420 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Entonces el polvo total que es arrastrado por los gases del pre-calentador es:



Polvo arrastrado por los gases de salida del pre-calentador= $474 \frac{kg}{h} + 6420 \frac{kg}{h}$

Polvo arrastrado por los gases de salida del pre-calentador= $6894 \frac{kg}{h}$

Esto se dio en una producción de 63 t/h, manteniendo constante la alimentación al horno. Entonces, este valor de polvos recuperados se lo toma como un porcentaje con respecto a la cantidad de crudo alimentado, así:

Porcentaje de polvo arrastrado por los gases del pre-calentador= $\frac{6894 \frac{kg}{h} \times 100}{63000 \frac{kg}{h}}$

Porcentaje de polvo arrastrado por los gases del pre-calentador= 10,943%

Peso del polvo del Clinker en el filtro F25:

Tabla 47

Peso real del polvo del clinker en el filtro F25

Descripción	Datos	
Fecha	10/01/2014	
Hora	11H00-13H00	
Retorno del filtro	2460	g
Tiempo de toma de muestra	2	h

Fuente: Tabla obtenida por el departamento de Producción de la planta Guapán- UCEM

Pero tal como deja notar la tabla anterior, este es el peso que se obtiene al hacer las mediciones por 2 horas, para tomar el valor a 1 hora, se debe realizar el siguiente cálculo:

Peso del polvo del Clinker en el filtro= $2460 \frac{kg}{2 h} = 1230 \frac{kg}{h}$

Peso real de Clinker producido y almacenado en el Hall:

Tabla 48

Datos generales del pesaje del polvo del Clinker producido y almacenado en el Hall:

Descripción	Datos	
Fecha	09/2014	
Hora	07H00-18H00	
Tiempo de toma de muestra	12	h

Fuente: Tabla obtenida por el departamento de Producción de la planta Guapán- UCEM



Si se desea tener mayor detalle de los valores pesados ese día se puede hacer una revisión de esto en el Anexo XVIII

Ahora, si esto se lo divide para 12 horas, en la que se realizaron las mediciones:

$$\text{Clinker} = 459910 \frac{\text{kg}}{12 \text{ h}} = 38325,833 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Y entonces sumando el polvo de Clinker del filtro F25 con este resultado, y dividiendo el caudal de alimentación de crudo al sistema, se obtiene el factor crudo Clinker:

$$\text{Clinker total} = 38325,833 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 1230 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Clinker total} = 39555,833 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Sabiendo que la alimentación promedio ese día, fue de 71,07 t/h, y haciendo promedio con la alimentación en el tiempo en que se realizó la medición del polvo de Clinker (71.05 t/h), se tiene:

$$\text{Factor crudo-clinker} = \frac{71060 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{39555,833 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 1,796$$

Este sería el factor crudo-clinker que ocupa la empresa, sin embargo, como se indicó en la parte anterior, para poder realizar el balance de energía, se sabe que esta corriente está dividida en 2 partes para salir del sistema, en Clinker obtenido a la salida del enfriador, que lo hace a las temperaturas nombradas, mientras que el 84linker que sale como polvo de Clinker lo hace a temperaturas similares a las del aire residual, por lo que para este trabajo se ha decidido convertir este único factor en 2 factores:

$$\text{Factor crudo-clinker en el enfriador} = \frac{71070 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{38325,833 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 1,854$$

$$\text{Factor crudo-polvo de clinker} = \frac{71050 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{1230 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 57,764$$



3.5. Tablas resumen de los datos obtenidos en la empresa

Fecha de toma de datos: 05-02-2014

Tabla 49

Datos provenientes del laboratorio

Parámetro	Valor	Unidad	Composición de óxidos del Clinker		
Humedad del crudo	0,7	%	Parámetro	Valor	Unidad
Título	77,6239	%	SiO2	22,783	%
Composición del crudo			Al2O3	4,028	%
SiO2	13,86	%	Fe2O3	3,02	%
Al2O3	2,29	%	CaO	67,165	%
Fe2O3	2,191	%	MgO	1,068	%
CaO	43,3	%	Composición del Clinker		
MgO	0,58	%	C4AF	9,1901	%
Módulos			C3A	5,5634	%
MF	1,05		C2S	15,4127	%
MdS	3,1		C3S	66,5419	%

Fuente: Laboratorio de operaciones físicas y químicas de la planta Guapán

Tabla 50

Datos provenientes del Panel de control

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad	Aire de enfriamiento			
Alimentación			Paredes del horno			Entradas	Caudal (m3/h)	Presión (mbar)	
Caudal de crudo	64	t/h	Distancia 0m	121,6	°C	F17	9022	52,5	64,5
Gases de salida del precalentador			Distancia 8m	220,6	°C	F18	10059	70	70,9
Presión estática	-428,5	mmH2O	Distancia 18m	316,84	°C	F19	29928	51,2	
Temperatura	361	°C	Distancia 25m	173,5	°C	F20	22069	44,5	
Entrada al horno			Distancia 27m	283	°C	F21	30248	38,6	
O2	1,1	%	Distancia 40m	176,8	°C	Combustible			
Aire residual (f27)			Distancia 57m	111,92	°C	Temperatura	131	°C	
Temperatura sal sist	278,3	°C	Promedio	200,609	°C	Caudal	3461	kg/h	

Fuente: Panel de control de la planta Guapán



Tabla 51

Datos tomados el día del balance

Parámetro	Valor	Unidad
Aire de enfriamiento y primario		
Temperatura	25,983	°C
Gases de salida		
CO 2	12,195	%
O2	5.6	%
Presión dinámica	27,83	mm H2O
Clinker		
Temperatura	170,3	°C
Datos ambientales		
Temperatura	20	°C
Aire residual (F27)		
Presión dinámica	5,43	mmH2O
Presión estática	1,387	mmH2O
Temperatura en chimenea	105,9	°C
Datos ambientales		
Temperatura	20	°C
Aire primario		
Presión manométrica	95	Mbar

Fuente: Departamento de Investigación y desarrollo de la planta Guapán y el autor

Tabla 52

Datos consultados en línea

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad del viento	2,33	m/s

Fuente: Meteored

De los datos mencionados con anterioridad, se cambiará el valor de la presión dinámica en los aires residuales a 1,65, la razón se explicará más adelante en la parte de validación de datos.



Fecha de toma de datos: 27-02-2014

Tabla 53

Datos provenientes del laboratorio

Parámetro	Valor	Unidad	Composición de óxidos del Clinker		
Humedad del crudo	0,8	%	Parámetro	Valor	Unidad
Título	76,9834	%	SiO2	20,399	%
Composición del crudo			Al2O3	4,28	%
SiO2	14,16	%	Fe2O3	3,106	%
Al2O3	2,67	%	CaO	65,564	%
Fe2O3	1,794	%	MgO	0,972	%
CaO	42,85	%	Composición del Clinker		
MgO	0,59	%	C4AF	9,4238	%
Módulos			C3A	6,0874	%
MF	1,49		C2S	1,5268	%
MdS	3,169		C3S	75,2816	%

Fuente: Laboratorio de operaciones físicas y químicas de la planta Guapán

Tabla 54

Datos provenientes del Panel de control

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad	Aire de enfriamiento			
Alimentación			Paredes del horno			Entradas	Caudal (m3/h)	Presión (mbar)	
Caudal de crudo	74	t/h	Distancia 0m	181	°C	F17	10029	73,1	89,2
Gases de salida del precalentador			Distancia 8m	185	°C	F18	9983	93	87
Presión estática	-437	mmH2O	Distancia 18m	291	°C	F19	30167	63,3	
Temperatura	350	°C	Distancia 25.5m	170	°C	F20	25999	53	
Entrada al horno			Distancia 27m	300	°C	F21	29751	37	
O2	0,8	%	Distancia 40m	170	°C	Combustible			
Aire residual (f27)			Distancia 57m	110	°C	Temperatura	134	°C	
Temperatura sal sist	276	°C	Promedio	201	°C	Caudal	3594	kg/h	

Fuente: Panel de control de la planta Guapán



Tabla 55

Datos tomados el día del balance

Parámetro	Valor	Unidad
Aire de enfriamiento y primario		
Temperatura	26,8	°C
Gases de salida		
CO 2	13,5	%
O2	4,21	%
Presión dinámica	16,93	mm H2O
Clinker		
Temperatura	112,25	°C
Datos ambientales		
Temperatura	20,5	°C
Aire residual (F27)		
Presión dinámica	5,989	mmH2O
Presión estática	1,56	mmH2O
Temperatura en chimenea	110,4	°C
Aire primario		
Presión manométrica	130	Mbar

Fuente: Departamento de Investigación y desarrollo de la planta Guapán y el autor

Tabla 56

Datos consultados en línea

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad del viento	1,643	m/s

Fuente: Meteored

De los datos mencionados con anterioridad, se cambiará el valor de la presión dinámica en los aires residuales a 1,85.

Lastimosamente, no todos los datos obtenidos van a poderse aplicar en el desarrollo del balance. Lo que sucede es que como se demostrará más adelante, la cantidad de aire que ingresa a la chimenea del ventilador F27, no es un dato confiable, debido a que al parecer ingresa demasiado aire falso en esta zona y no se dispone de un punto de muestreo más cercano para su medida. Afortunadamente, en el diseño del enfriador se especifica que el aire que ingresa por los ventiladores se dividen en el aire residual y secundario, según una relación en el que el primer aire es el que entra por los ventiladores F20 y F21; mientras



que los ventiladores restantes serán los que ingresen el aire secundario al sistema. Razón por la cual se cambiará la presión dinámica del aire residual en la chimenea para que los datos no se descuadren.

3.6. Cálculo de los módulos

En el Anexo XX se harán los cálculos de los primeros datos para mostrar el procedimiento de los módulos y en esta sección se dará una tabla mostrando los resultados de los dos datos. Los resultados de ambas fechas son:

Tabla 57

Resultados de los módulos

Módulo	05/02/2014	27/02/2014
MH	2,36	2,301
MS	6,05	5,3
MdS	3,09	3,17
MF	1,045	1,49

3.7. Cálculo de la composición potencial del Clinker

Se procede igual que antes y los cálculos son presentados en el Anexo XXI.

Tabla 58

Resultados de la composición potencial

Composición potencial	05/02/2012	27/02/2012
C4AF	9,18	9,44
C3A	5,57	6,09
C2S	13,42	-0,796
C3S	68,824	78,61

3.8. Cálculo del balance de masa

Los cálculos más a detalle de los flujos de masa se muestran en el Anexo XXII con los datos de la fecha 05-02-2014; en esta sección se señala solamente los valores obtenidos después de dichos cálculos.



Tabla 59

Resultados obtenidos del balance de masa para la fecha 05-02-15 (con aire falso calculado a partir de la composición de los gases de salida del pre-calentador)

Balance másico											
Datos de entrada						Datos de salida					
Descripción	kg/h	t/h	kg/día	t/día	kg/kg de kk	Descripción	kg/h	t/h	kg/día	t/día	kg/kg de kk
Alimentación seca	63552,000	63,552	1525248,000	1525,248	1,784	Clinker	34519,957	34,520	828478,968	828,479	0,969
Agua en el crudo	448,000	0,448	10752,000	10,752	0,013	Polvo de Clinker	1107,956	1,108	26590,944	26,591	0,031
Combustible	3461,000	3,461	83064,000	83,064	0,097	Polvo de crudo	6995,200	6,995	167884,800	167,885	0,196
Aire de enfriamiento	93343,836	93,344	2240252,064	2240,252	2,620	Aire residual	48472,676	48,473	1163344,224	1163,344	1,361
Aire primario	12378,623	12,379	297086,952	297,087	0,347	Gases de salida	113594,352	113,594	2726264,448	2726,264	3,188
Aire falso	31881,734	31,882	765161,616	765,162	0,895	Pérdidas indeterminadas	375,052	0,375	9001,248	9,001	0,011
Total	205065,193	205,065	4921564,632	4921,565	5,756	Total	205065,193	205,065	4921564,632	4921,565	5,756

O también se puede obtener los aires falsos como la diferencia entre la sumatoria de entrada de masa y las salidas de masa, así:



Tabla 60

Resultados obtenidos del balance de masa para la fecha 05-02-15 (con aire falso como diferencia)

Balance másico											
Datos de entrada						Datos de salida					
Descripción	kg/h	t/h	kg/día	t/día	kg/kg de kk	Descripción	kg/h	t/h	kg/día	t/día	kg/kg de kk
Alimentación seca	63552,000	63,552	1525248,000	1525,248	1,784	Clinker	34519,957	34,520	828478,968	828,479	0,969
Agua en el crudo	448,000	0,448	10752,000	10,752	0,013	Polvo de Clinker	1107,956	1,108	26590,944	26,591	0,031
Combustible	3461,000	3,461	83064,000	83,064	0,097	Polvo de crudo	6955,200	6,955	166924,800	166,925	0,195
Aire de enfriamiento	93343,836	93,344	2240252,064	2240,252	2,620	Aire residual	48472,676	48,473	1163344,224	1163,344	1,361
Aire primario	12378,623	12,379	297086,952	297,087	0,347	Gases de salida	113594,352	113,594	2726264,448	2726,264	3,188
Aire falso	31466,682	31,467	755200,368	755,200	0,883						
Total	204650,141	204,650	4911603,384	4911,603	5,744	Total	204650,141	204,650	4911603,384	4911,603	5,744



Y haciendo las mismas operaciones con los otros datos:

Tabla 61

Resultados obtenidos del balance de masa para la fecha 27-02-15 (con aire falso calculado a partir de la composición de los gases de salida del pre-calentador)

Balance másico											
Datos de entrada						Datos de salida					
Descripción	kg/h	tm/h	kg/día	tm/día	kg/kg de kk	Descripción	kg/h	tm/h	kg/día	tm/día	kg/kg de kk
Alimentación seca	73408,000	73,408	1761792,000	1761,792	1,782	Clinker	39913,700	39,914	957928,800	957,929	0,969
Agua en el crudo	592,000	0,592	14208,000	14,208	0,014	Polvo de clinker	1281,070	1,281	30745,680	30,746	0,031
Combustible	3594,000	3,954	94896,000	94,896	0,087	Polvo de crudo	8088,200	8,088	194116,800	194,117	0,196
Aire de enfriamiento	98432,400	98,432	2362377,600	2362,378	2,389	Aire residual	51040,700	51,041	1224976,800	1224,977	1,239
Aire primario	10169,900	10,170	244077,600	244,078	0,247	Gases de salida	105534,973	105,535	2532839,341	2532,839	2,559
Aire falso	20477,347	20,477	491456,338	491,456	0,496	Pérdidas indeterminadas	1175,005	1,175	28200,116	28,200	0,022
Total	207033,647	207,034	4968807,538	4968,808	5,016	Total	207033,647	207,034	4968807,538	4968,808	5,016

O también se puede obtener los aires falsos como la diferencia entre la sumatoria de entrada de masa y las salidas de masa, así:



Tabla 62

Resultados obtenidos del balance de masa para la fecha 27-02-15 (con aire falso como diferencia)

Balance másico											
Datos de entrada						Datos de salida					
Descripción	kg/h	tm/h	kg/día	tm/día	kg/kg de kk	Descripción	kg/h	tm/h	kg/día	tm/día	kg/kg de kk
Alimentación seca	73408,000	73,408	1761792,000	1761,792	1,782	Clinker	39913,700	39,914	957928,800	957,929	0,969
Agua en el crudo	592,000	0,592	14208,000	14,208	0,014	Polvo de clinker	1281,070	1,281	30745,680	30,746	0,031
Combustible	3954,000	3,954	94896,000	94,896	0,087	Polvo de crudo	8088,200	8,088	194116,800	194,117	0,196
Aire de enfriamiento	98432,400	98,432	2362377,600	2362,378	2,389	Aire residual	51040,700	51,041	1224976,800	1224,977	1,239
Aire primario	10169,900	10,170	244077,600	244,078	0,247	Gases de salida	105534,973	105,535	2532839,341	2532,839	2,559
Aire falso	19302,343	19,302	463256,221	463,256	0,474						
Total	205858,643	205,859	4940607,421	4940,607	4,994	Total	205858,643	205,859	4940607,421	4940,607	4,994



3.9. Cálculos del balance de energía

Al igual que con los cálculos del balance de masa, los cálculos más a detalle de los flujos de energía se muestran en un anexo, el Anexo XXIII con los datos de la fecha 05-02-2014; en esta sección se señala solamente los valores obtenidos después de dichos cálculos.



Tabla 63

Resultado del balance de calor obtenido para la fecha 05-02-15

Balance energético							
Datos de entrada				Datos de salida			
Descripción	kcal /h	kcal /día	kcal /kg de kk	Descripción	kcal /h	kcal /día	kcal /kg de kk
Calor sensible de alimentación de crudo	366854,400	8804505,600	10,297	Calor sensible del Clinker	961920,004	23086080,096	26,999
Calor sensible del combustible	169995,668	4079896,032	4,771	Calor sensible del Polvo de clinker	54661,342	1311872,208	1,534
Calor de combustión	32624739,680	782993752,320	915,707	Calor sensible del Polvo de crudo	583443,907	14002653,768	16,376
Calor sensible del aire primario	18368,064	440833,536	0,516	Calor sensible del Aire residual	3175196,825	76204723,800	89,121
Calor sensible del aire de enfriamiento	138502,090	3324050,160	3,887	Calor sensible de los gases de salida	9238450,124	221722802,976	259,304
				Calor de rad y conv en el precalentador	1683410,060	40401841,440	47,250
				Calor de rad y conv en el horno	2057495,202	49379884,848	57,750
				Calor de rad y conv en el enfriador	165267,276	3966414,624	4,639
				Calor de reacción	14900245,420	357605890,080	418,218
				Calor de evaporación	255644,928	6135478,272	7,175
				Perdidas indeterminadas	242724,814	5825395,536	6,813
Total	33318459,902	799643037,648	935,179	Total	33318459,902	799643037,648	935,179



Y para el otro grupo de datos, realizando las mismas operaciones, se tiene:

Tabla 64

Resultado del balance de calor obtenido para la fecha 27-02-15

Balance energético							
Datos de entrada				Datos de salida			
Descripción	kcal/h	kcal /día	kcal /kg de kk	Descripción	kcal /h	kcal /día	kcal /kg de kk
Calor sensible de alimentación de crudo	413111,320	9914671,670	10,028	Calor sensible del Clinker	676432,776	16234386,633	16,420
Calor sensible del combustible	180796,839	4339124,145	4,389	Calor sensible del Polvo de Clinker	62361,858	1496684,588	1,514
Calor de combustión	33878449,254	813082782,096	822,397	Calor sensible del Polvo de crudo	654319,353	15703664,477	15,884
Calor sensible del aire primario	15892,123	381410,941	0,386	Calor sensible del Aire residual	3300553,178	79213276,280	80,121
Calor sensible del aire de enfriamiento	153815,914	3691581,940	3,734	Calor sensible de los gases de salida	8309440,873	199426580,956	201,711
				Calor de rad y conv en el precalentador	1676821,357	40243712,566	40,705
				Calor de rad y conv en el horno	2161794,517	51883068,399	52,477
				Calor de rad y conv en el enfriador	163786,499	3930875,965	3,976
				Calor de reacción	17260523,319	414252559,657	418,998
				Calor de evaporación	337816,512	8107596,288	8,200
				Perdidas indeterminadas	38215,208	917164,984	0,928
Total	34642065,450	831409570,793	840,934	Total	34642065,450	831409570,793	840,934



3.10. Validación de datos

a) Aire de enfriamiento

El caudal volumétrico de aire de enfriamiento se puede verificar mediante una revisión a los valores que se tienen programados para que ingresen al sistema y haciendo una comparación con los valores de los fluxómetros instalados en el área, se consiguió los resultados siguientes:

Tabla 65

Valores de seteo del aire de enfriamiento

	Valor real	Valor Indicado	Error
Ventilador	m3/h	m3/h	%
17	9022	9000	0,24
18	10059	10000	0,656
19	29928	30000	0,24
20	22069	22000	0,314
21	30248	30000	0,83

Fuente: Datos obtenidos de Panel de Control de Planta Guapán

Dicho cuadro indica que los fluxómetros para la medición del aire que ingresa como aire de enfriamiento es correcta y que los valores que deberían dar se cumplen con cierto grado de error.

b) Aire residual

De acuerdo a la empresa, de los cinco caudales de aire que ingresa como aire de enfriamiento, solo los tres primeros van hacia el horno, como aire secundario, pero, lo que se va como aire residual es aproximadamente igual al aire que fue ingresado por los ventiladores F20 y F21; por lo tanto el valor de aire que egresa como tal es la suma de estos dos caudales:

$$m_{\text{aire res}} = 7053,86 \frac{kg}{h}$$

$$m_{\text{aire res}} = (20112,165 + 21155,964) \times 1,2929$$

$$m_{\text{aire res}} = 53235,886 \frac{kg}{h}$$

Ahora, si se usara el valor de aire que era estimado según la presión dinámica de los gases residuales obtenidos a la salida de la chimenea del ventilador F27:

$$m_{\text{aire comb}} = m_{\text{aire primario}} + m_{\text{aire sec}}$$

De donde:



$$m_{\text{aire sec.}} = m_{\text{enfriamiento}} - m_{\text{aire res}}$$

Y:

-Cálculo del caudal másico del aire residual

$$m_{\text{aire res}} = v_{\text{aire res}} \times \rho \times A_{\text{chim}}$$

-Cálculo de la velocidad del aire residual

$$v_{\text{aire res}} = 4,43k \sqrt{\frac{P_{\text{din aire res}}}{\rho}}$$

$$v_{\text{aire res}} = 4,43 \times 1 \sqrt{\frac{5.989}{0.682}}$$

$$v_{\text{aire res}} = 13,128 \frac{m}{s}$$

$$v_{\text{aire res}} = 13,128 \frac{m}{s} \times 3600 \frac{s}{h}$$

$$v_{\text{aire res}} = 47259,726 \frac{m}{h}$$

-Cálculo del caudal másico del aire residual

$$m_{\text{aire res}} = v_{\text{aire res}} \times \rho \times A_{\text{chim}}$$

$$m_{\text{aire res}} = 47259,726 \frac{m}{h} \times 0,682 \frac{kg}{m^3} \times 2,865m^2$$

$$m_{\text{aire res}} = 92342,195 \frac{kg}{h}$$

Entonces, el aire secundario sería:

$$m_{\text{aire sec.}} = 93343,836 - 92342,195$$

$$m_{\text{aire sec.}} = 1001,641 \frac{kg}{h}$$

Y el aire de combustión se vería reducido a esto:

$$m_{\text{aire comb}} = 12378,623 + 1001,641 = 13380,264 \frac{kg}{h}$$

Lo cual nunca podría llegar a darse porque no se cumpliría con la mínima cantidad necesaria para que combustione todo el fuel oil, razón por la cual, se dice que existe una gran cantidad de aires falsos en este sistema

c) Clinker más el polvo de Clinker recuperado del filtro



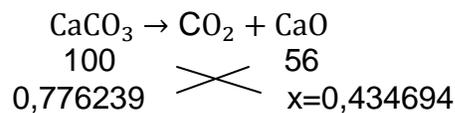
$$m_{\text{alim}} = 64000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{polvo crudo}} = 6955,2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Pérdidas al fuego=35%

Título= 77,6239%

Si el crudo que ingresa tiene ese título (que representa la cantidad de carbonato de calcio que contiene dicho caudal), entonces, este se puede descomponer así:



Para obtener la cantidad de óxido de calcio que tendrá dicha mezcla:

$$\text{CaO} = (64000 - 6955,2) \times 0,434694 = 24797,032$$

Y el resto de óxidos que tendrá el crudo vendrá dado por la diferencia:

$$\text{Otros óxidos} = (64000 - 6955,2) \times (1 - 0,776239) = 12764,401$$

$$m_{\text{clinker total}} = 2479,032 + 12764,401$$

$$m_{\text{clinker total}} = 37561,433 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Comparándolo con el valor del Clinker total obtenido:

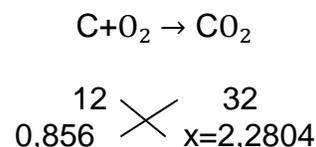
$$m_{\text{clinker total}} = 1107,956 + 34519,957$$

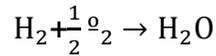
$$m_{\text{clinker total}} = 35627,913 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Y el error en esto es de 5,148%.

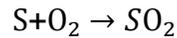
d) Gases de salida del pre-calentador

El oxígeno necesario para que se produzca la combustión se ve afectado por la composición de carbono, hidrógeno, azufre y el mismo oxígeno que contiene el combustible:





$$\begin{array}{cc} 2 & 16 \\ 0,104 & x=0,8253 \end{array}$$



$$\begin{array}{cc} 32 & 32 \\ 0,01783 & x=0,01783 \end{array}$$

Y se restaría la cantidad de oxígeno existente en el combustible, que según el dato es 0,25%:

$$m_{\text{oxígeno ímimo}} = 2,2804 + 0,8253 + 0,01783 - 0,0025 = 3,121 \frac{\text{kg de O}_2}{\text{kg de combustible}}$$

$$m_{\text{aire teórico}} = \frac{3,121 \text{ kg de O}_2}{23 \text{ kg de O}_2} 100 \text{ kg de aire} = 13,57 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}}$$

$$m_{\text{aire teórico}} = 13,57 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}} \times 3461 \frac{\text{kg de combustible}}{\text{h}} = 46965,77 \frac{\text{kg de aire}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{aire residual}} = 48472,676 \frac{\text{kg de aire}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{aire sec.}} = 93343,836 - 48472,676 = 44871,16 \frac{\text{kg de aire}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{aire primario}} = 12378,623 \frac{\text{kg de aire}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{aire de combustión}} = 12378,623 + 44871,16 = 57249,783$$

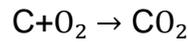
$$\% \text{ Aire en exceso} = \left(\frac{57249,783}{46965,77} - 1 \right) 100 = 21,897\%$$

$$m_{\text{aire en exceso}} = 57249,783 - 46965,77 = 10284,013 \frac{\text{kg de aire}}{\text{h}}$$

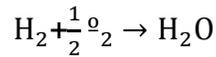
Entonces la cantidad de gases de salida del pre-calentador, debe estar compuesta de:

- Gases de combustión
- CO_2 formado por el crudo
- Agua proveniente del crudo
- Aire en exceso
- Aire falso

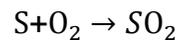
De donde los gases:



$$\begin{array}{r} 12 \\ 0,856 \end{array} \times \begin{array}{r} 44 \\ x=3,139 \end{array}$$



$$\begin{array}{r} 2 \\ 0,104 \end{array} \times \begin{array}{r} 18 \\ x=0,936 \end{array}$$



$$\begin{array}{r} 32 \\ 0,01783 \end{array} \times \begin{array}{r} 64 \\ x=0,03566 \end{array}$$

Pero el oxígeno ocupado para que se forme estos compuestos se encuentra en el aire:

$$\begin{array}{r} \text{Aire} \\ 100 \\ 46965,77 \end{array} \times \begin{array}{r} N_2 \\ 77 \\ x=36163,643 \end{array}$$

Gases de combustión (sin el nitrógeno)=3,139+0,936+0,03566

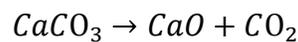
Gases de combustión (sin el nitrógeno)=4,11066 $\frac{\text{kg de gases}}{\text{kg de combustible}}$

Gases de combustión (sin el nitrógeno)=4,11066×3461

Gases de combustión (sin el nitrógeno)=14226,994 kg/h

Gases de combustión=14851,815+36163,643

Gases de combustión=51015,458



$$\begin{array}{r} 100 \\ 0,776239 \end{array} \times \begin{array}{r} 44 \\ x=0,3415 \end{array}$$

CO₂ formado por el crudo=(64000-6955.2)×0,3415

CO₂ formado por el crudo=19480,799

Agua proveniente del crudo=448

Aire en exceso= 10284,013

Aire falso= 31881,734



Gases de salida del pre-calentador= 51015,458+ 19480,799+ 448+ 10284,013+ 31881,734

Gases de salida del pre-calentador= 113110,004 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$

De donde los resultados obtenidos en el balance fueron:

Gases de salida del pre-calentador= 113594,352 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$

Y el error sería de 0,428%

En cuanto al balance térmico, para asegurar que los resultados sean correctos, lo que se hace es simplemente asegurarse que todos los equipos estén calibrados, cosa que por fortuna, Guapán lo hace cada año con sus instrumentos.

3.11. Rendimiento térmico del sistema

Para el cálculo del rendimiento térmico del sistema, se divide la energía útil del mismo, para la cantidad de energía que ingresa al mismo, de manera que la fórmula para dicho rendimiento se utiliza la fórmula:

$$\eta_s = 100 \frac{q_{reacción}}{q_{total}}$$

De donde:

η_s : Rendimiento térmico del sistema

Los resultados obtenidos mediante los cálculos anteriores, son los siguientes:

Tabla 66

Resultados obtenidos del rendimiento térmico del sistema pre-calentador- horno- enfriador

Fecha	Rendimiento térmico
05-02-15	44,72%
27-02-15	49,825%

Éstos números parecen bajos, pero en realidad según los valores que se han revisado en algunos otros balances, este valor suele ser ligeramente superior a 55% (según los valores dados en su manual por el Ingeniero Percy Castillo) en el horno, pero aquí se está considerando todo el sistema. Lo que sí es claro es que este valor puede mejorar incluso más a lo que se muestra en esta tabla, debido a que se han visto producciones hasta de 76 t/h (en lo personal), antes de que el horno sufriera pérdidas de eficiencia cerca de noviembre del año 2014.



3.12. Rendimiento térmico del enfriador

Existen varias formas para calcular el rendimiento térmico del enfriador, el método que se ha decidido ocupar para este trabajo, y también el que será usado en el programa, es el que se muestra a continuación, en el que se toma en cuenta el calor aportado por el Clinker y el del aire secundario.

$$\eta_e = 100 \frac{q_{aire\ secundario}}{q_{clinker\ al\ ingreso}}$$

De donde:

η_e : Rendimiento térmico del enfriador

De acuerdo a esta fórmula se obtienen los valores de rendimiento de este equipo.

Tabla 67

Datos de temperatura del aire secundario

Fecha	Temperatura del aire secundario
05-02-15	759 °C
27-02-15	856 °C

Fuente: Datos obtenidos del panel de control

-Cálculo del calor del aire secundario

$$q_{aire\ secundario} = (m_{aenfriamiento} - m_{aire\ residual}) c_{pa2}(t_{a2} - t_{amb})$$

$$q_{aire\ secundario} = (93343,836 - 48472,676) c_{pa2}(759 - 20)$$

De donde:

$$c_{pa2} = 0,247 + 4,4 \times 0,00001 \times \left(\frac{759+20}{2}\right)$$

$$c_{pa2} = 0,264$$

$$q_{aire\ secundario} = (93343,836 - 48472,676) 0,264(759 - 20) = 8754183,831 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor del clinker

$$q_{clinker\ al\ ingreso\ del\ enfriador} = (m_{clinker} + m_{polvo\ de\ kk}) c_{pkk}(t_{kk} - t_{amb})$$

$$q_{clinker\ al\ ingreso\ del\ enfriador} = (34519,957 + 1107,956) c_{pkk}(1300 - 20)$$

De donde:

$$c_{pclinker} = 0,18 + 0,000071 \times \left(\frac{1300+20}{2}\right)$$



$$c_{p\text{clinker}} = 0,227$$

$$q_{\text{clinker al ingreso del enfriador}} = (34519,957 + 1107,956)0,227(1300 - 20)$$

$$q_{\text{clinker al ingreso del enfriador}} = 10352046,4 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

-Cálculo del rendimiento del enfriador

$$\eta_e = 100 \frac{q_{\text{aire secundario}}}{q_{\text{clinker al ingreso}}}$$

$$\eta_e = 100 \frac{8754183,831}{10352046,4}$$

$$\eta_e = 84,565\%$$

Aquí cabe hacer una aclaración, y es que como se nota, en los datos no se anota una temperatura de salida del Clinker del enfriador. Lo que se hizo para dar el valor antes expuesto, es que se toma un valor estimado de la temperatura de acuerdo a valores históricos del mismo; el problema se debe a que en un principio la planta poseía un medidor de temperatura para obtener dicho valor, pero cerca de la fecha de inicio de este trabajo dicho equipo fue removido y ya no se tenían valores de dicha temperatura, además la temperatura es tan alta que los pirómetros de mano no alcanzan dicha temperatura.

Los resultados obtenidos mediante los cálculos anteriores, son los siguientes:

Tabla 68

Resultados obtenidos del rendimiento teórico del enfriador

Fecha	Rendimiento térmico
05-02-15	84,565%
27-02-15	88,169%

4. Herramienta informática

4.1. Glosario de variables dentro de la herramienta

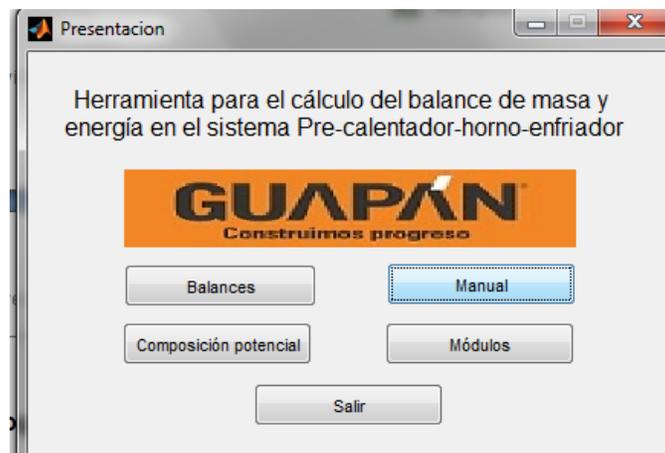
Dentro de la herramienta se usa una serie de variables que servirán para almacenar los valores, tanto de datos necesarios para calcular el balance, como los resultados de los mismos, por lo que, para evitar confusiones a la hora de revisar la programación que se describirá en el Anexo XXV.

4.2. Programación y descripción de la herramienta

La herramienta a elaborar, se basa en la programación de Matlab, sin embargo, también se ayuda del programa Excel para el guardado y cargado de datos.

4.2.1. Descripción de los botones de la primera ventana: “Presentacion”

Para empezar, la herramienta consta de una ventana en la que se presenta a la misma, en la que se muestran 5 botones.



Gráfica N°11: Ventana de presentación de la herramienta

Fuente: El autor

También, antes de que la herramienta se cargue, es necesario que el programa recoja la imagen y la ponga en el axes1 de esta ventana y que posicione a esta en el centro de la pantalla, razón por la cual, también necesita una codificación, la cual se muestra en el Anexo XXVI.I.

Botón Manual: El primer botón que se describe es el que tiene escrito la palabra “Manual”. Dicho botón permite al usuario acceder al documento que tiene el mismo nombre. Al hacerlo, dentro de este documento se muestra las ecuaciones con las cuales se realiza el balance de masa y energía, que dicho sea de paso, son las mismas ecuaciones que se muestran en la sección Resultados de este documento. Cuando se presiona este botón aparecerá en la pantalla el documento



mencionado, sin que la primera ventana deje de permanecer activa. El documento se puede cerrar normalmente y seguir usando esta ventana. La codificación de este botón está en el Anexo XXVI.II.

Botón “Composicion_potencial”: Otro botón a describir es el botón con el texto “Composición potencial”. Al hacer click sobre este botón se abre otra ventana y se cierra la ventana de Presentación. La nueva ventana permitirá calcular la composición potencial del Clinker a partir de la composición de óxidos del Clinker. Su codificación es presentada en el Anexo XXVI.III.

Botón “modulo”: El siguiente botón, es el botón que dice “Módulos”. Al hacer click sobre este botón se abre otra ventana y se cierra la ventana de Presentación. La nueva ventana permitirá calcular los módulos del crudo a partir de la composición de óxidos del crudo. Su codificación es muy parecida a la anterior, pero de todas maneras se la describe en el Anexo XXVI.IV.

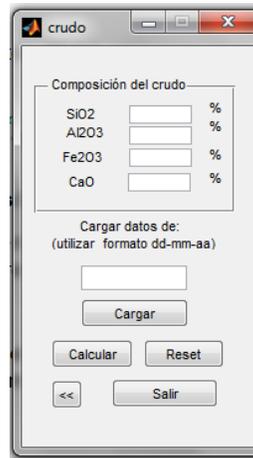
Botón balance: Es el botón en el que se lee “Balances”, es el más importante que se encuentra en esta ventana. Este botón permite abrir otra ventana (al mismo tiempo que cierra la de presentación), en la cual se pueden escribir los datos que serán necesarios para la obtención del balance de masa y energía en nuestro sistema. Su codificación está descrita en el Anexo XXVI.V.

Botón salir: El último botón, “Salir”, sirve para cerrar la ventana y por lo tanto el programa.

Este último botón está presente en cada una de las ventanas que se abrirán del programa y su codificación no variará, por lo que solo se muestra su codificación una vez en el Anexo XXVI.VI.

4.2.2. Descripción de los botones de la ventana: “crudo”

Para acceder a esta ventana se debía acceder desde el botón que ponía: “Módulos”. Al hacerlo aparece una ventana que se ve así:



Gráfica N°12: Ventana de cálculo de módulos de la herramienta

Fuente: El autor

En esta ventana se ven 5 botones, los cuales se muestran a continuación:

Botón “Cargar”: Toma los datos del documento de Excel “Datos”. Tal como se muestra en la ventana, se debe escribir la fecha en la que se registraron los datos con el formato dd-mm-aa, debido a que es en este formato en el que guarda la herramienta. Si al momento de dar click a este botón no hay nada escrito en el edit text, entonces la herramienta, colocará un mensaje que dice “Ingrese nombre de hoja” y el edit text se vuelve de color rojo. Si se da click sobre este edit text y se presiona una tecla, se borra este texto y el color de fondo vuelve a ser blanco. Si el nombre de la hoja no existe, no pasará nada, debido a que Matlab no puede determinar si existe o no una hoja con el nombre especificado. Si el nombre de la hoja es correcto, entonces se escribirán los valores de cada uno de los porcentajes de los óxidos nombrados en la parte superior de esta ventana en sus respectivos edit text. Su codificación se describe en el Anexo XXVI.VII.

Además para poder realizar todo lo descrito se ayuda de otra codificación que se encuentra en el edit text carga, cuya codificación está en el mismo anexo antes mencionado.

Botón Calcular: Toma los datos descritos en esta ventana y calcula los módulos, al mismo tiempo que hace invisible al botón cargar, al static text y al edit text para esta función. Luego cambia el texto contenido en los static text (de los nombres de los óxidos a los nombres de los módulos) y en los edit text escribe ahora los resultados de los módulos. Su codificación está dado en el Anexo XXVI.VIII.

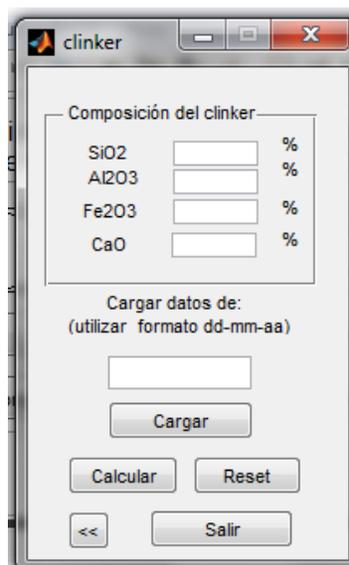
Botón Reset: vuelve a dejar la pantalla tal como era al inicio, sin nada escrito en los edit text de los óxidos, ni nada escrito en el edit text de carga. Así mismo

vuelve a nombrar a los static text como estaban en un principio, es decir con los nombres de los óxidos. Su codificación se describe en el Anexo XXVI.IX.

Botón <<: Lo que hace es regresar a la ventana anterior (es decir que vuelve a abrir la ventana anterior: “Presentacion” y cierra la actual). Su codificación se describe en el Anexo XXVI.X.

4.2.3. Descripción de los botones de la ventana: “clinker”

Para acceder a esta ventana se debía acceder desde el botón que ponía: “Composición potencial”. Al hacerlo aparece una ventana que se ve así:



Gráfica N°13: Ventana de cálculo de composición potencial de la herramienta

Fuente: El autor

Los botones realizan las mismas acciones que las antes mencionadas para el crudo, con la excepción de que no calcula módulos del crudo sino la composición potencial del clinker, así que no se describirá cada botón nuevamente, sino simplemente se indica el anexo en donde se encuentra la codificación de cada uno de estos:

Botón “Cargar”: su codificación se encuentra en el Anexo XXVI.XI.

Botón “Calcular”: su codificación se encuentra en el Anexo XXVI.XII.

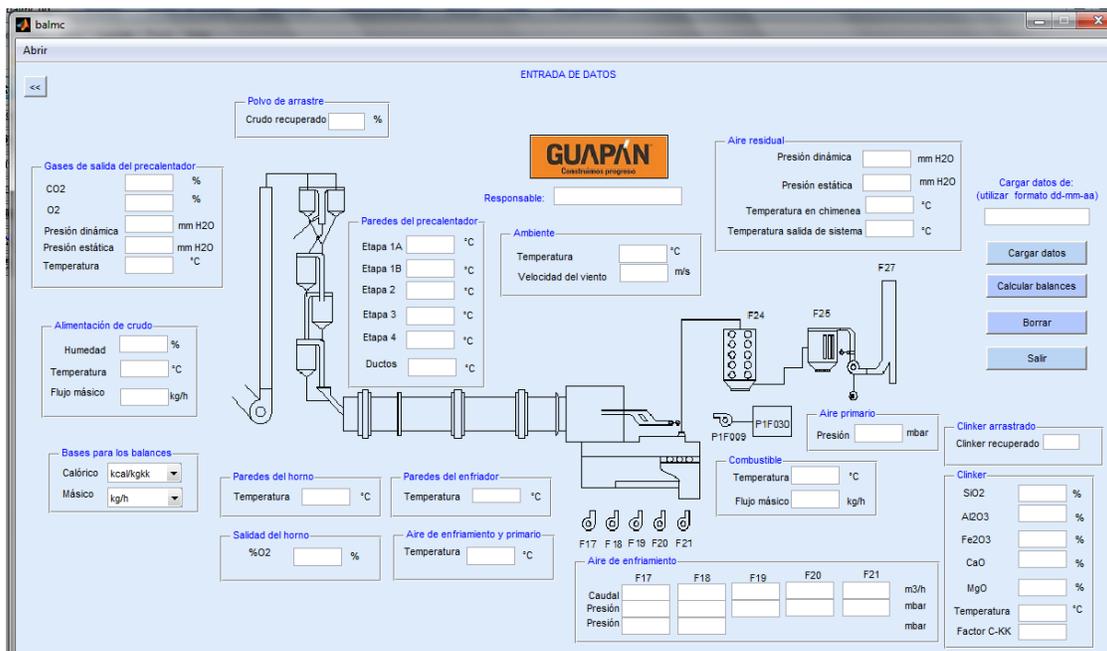
Botón “Reset”: su codificación se encuentra en el Anexo XXVI.XIII.

Botón <<: su codificación se encuentra en el Anexo XXVI.XIV.

4.2.4. Descripción de los botones de la ventana: “balmc”

En esta ventana es donde se escriben los datos que serán necesarios para realizar el balance. En la misma ventana de la herramienta, vienen descritos cuales son los datos que serán necesarios para ingresar en el sistema y las unidades en las que se las requiere. La ventaja de realizar la herramienta en la planta radica en que, conociendo ya las unidades en las que se trabaja dentro de ésta, se puede facilitar las conversiones necesarias dentro de la misma herramienta. Los datos obtenidos dentro del panel, son pedidos en la herramienta con las mismas unidades en las que allí son descritas, en cuanto a los datos obtenidos dentro de la planta, no requieren mayor conversión en cuanto a temperaturas, pero en cuanto a presiones, es solo cuestión de especificar la unidad deseada en el texto o en el display del pitot.

La ventana se ve así:



Gráfica N°14: Ventana de cálculo de balances de masa y energía de la herramienta

Fuente: El autor

Y como se ve en la imagen, los datos necesarios para la que la herramienta funcione, vienen dados en grupos de la corriente en la que se toman y estos grupos están cerca de su lugar de toma en el diagrama, para que se vea con mayor facilidad a lo que se refiere. Entonces, en el programa se necesita de una codificación previa a que el programa se cargue para que tome la imagen del diagrama y para que se registre cuales serán las unidades en caso de que no se



modifiquen las unidades en los popumenu. Entonces, la codificación para que se haga todo esto queda descrita en el Anexo XXVI.XV.

De donde, de la codificación se distingue que, el movegui, nos ayuda a que la ventana quede en el centro de la pantalla, mientras que el imread nos permite almacenar la imagen en la variable "imagen" y luego image nos permite verla en el axes 1, mientras que "axis off" desactiva el sistema cartesiano que se ve en los axes.

La función global ayuda a que las variables menm y mene puedan ser ocupadas en otras ventanas u otros botones (en este caso estas variables va a ser ocupadas luego en otras codificaciones dentro de esta ventana y en las 2 siguientes ventanas), debido a que estas variables almacenan las unidades en la que aparecerán los resultados de los balance de masa y energía. También lee las variables que se encuentran en la hoja de Excel Datos.

En cuanto a los botones presentes en esta ventana se describen a continuación:

Botón <<: Su codificación fue detallada en el Anexo XXVI.XVI.

Botón Cargar datos: Hace exactamente lo mismo que los botones cargar antes descritos. Toma datos desde el documento de Excel de nombre Datos, desde la pestaña con el nombre de la fecha en la que se especificó en el edit box cargar. Al igual que los botones cargar antes mencionados, si el nombre no existe no hará nada, pero si no hay nombre aparecerá un mensaje de error en el edit text y este se volverá de color rojo. Para eliminar el mensaje de error y que la pantalla se vuelva blanca nuevamente se debe dar un click sobre el edit text cargar y presionar cualquier tecla. La codificación está descrita en el Anexo XXVI.XVII.

Como se deja ver en las líneas de codificación lo que se hace primero es determinar es si el edit text está o no vacío, en caso de que sí lo esté, devuelve el mensaje de error y cambia el fondo del edit text en rojo; caso si no lo está busca la pestaña en el documento y si la encuentra carga los datos desde allí como si se tratara de una matriz. La razón por la que carga el documento como una matriz es que si se cargara uno a uno los datos, la función ejecutada se demoraría mucho más. Luego se toma la matriz cargada y empieza a escribir los valores cargados en los edit text de acuerdo a lo que corresponde. En cuanto a la codificación en el edit text se encuentra en el mismo anexo mencionado anteriormente.

La codificación de este botón, lo que hace primero es devolver a la casilla al color blanco, para luego borrar su contenido; esta codificación se cumple cuando se presiona una tecla cuando el cursor está en este edit text.



Botón Borrar: Borra todos los datos escritos en los edit text, incluyendo el edit text “carga”. Se ejecuta cuando se da click sobre este botón. La codificación se encuentra en el Anexo XXVI.XVIII.

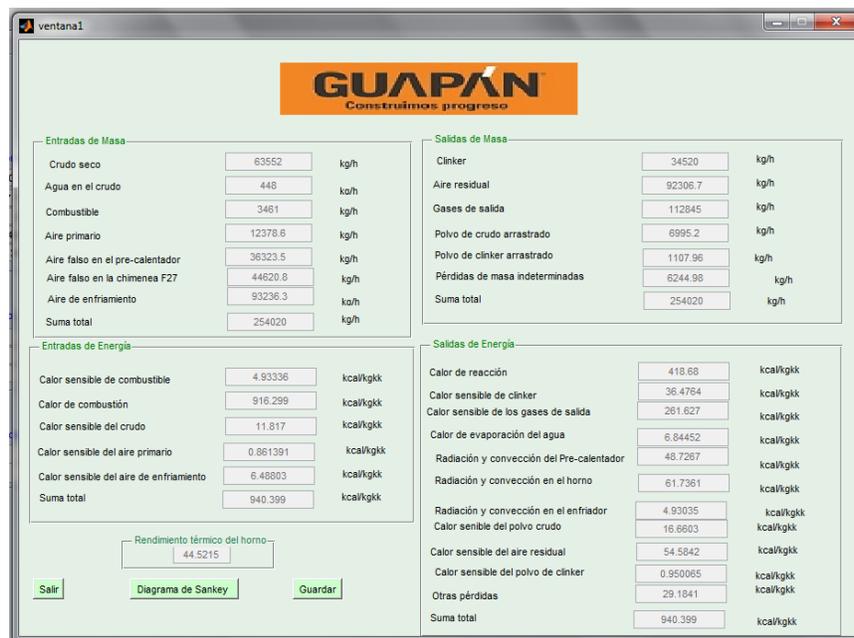
Botón calcular: Aquí es donde realmente se calcula los resultados del balance de masa y el de energía. Su codificación se describe en el Anexo XXVI.XIX.

Lo primero que hace el programa es determinar cuáles son las variables que van a servir en otras partes de la programación y lo que hace es globalizar dichas variables. Luego el programa lee todos los valores ingresados en esta ventana y las guarda como una variable. Luego hace los cálculos intermedios para luego realizar el balance de masa y luego el de energía. Finalmente transforma los valores obtenidos de masa (que se calculan en kg a t) y pasa finalmente a abrir la ventana en la que se visualizarán los resultados de los balances.

4.2.5. Descripción de los botones de la ventana: ventana1

En esta ventana se presentan los resultados obtenidos de los balances. A pesar de que los resultados aquí presentados, son mostrados mediante edit text, estos no pueden ser modificados al intentar escribir sobre ellos, debido a que se modificaron las propiedades de estos, cambiando la propiedad Enable a off.

La ventana que se presenta se ve así:



Gráfica N°15: Ventana de resultados de los cálculos del balance de masa y energía de la herramienta

Fuente: El autor



Al momento de cargar esta ventana se deben realizar otras acciones, las cuales vienen descritas en la codificación del Anexo XXVI.XX.

En esta codificación, lo que se hace es transformar los resultados (obtenidos en kg/h y en kcal/h) en las unidades pedidas en la ventana anterior, para lo cual solo se usan constantes conocidas para transformación de unidades. Otra acción que se realiza de acuerdo a la codificación es colocar en los static text, cuales son las unidades en las que se expresa el resultado, además coloca el resultado en los edit text.

Además aquí se nota que existen 2 botones adicionales al botón salir, los cuales se describen a continuación:

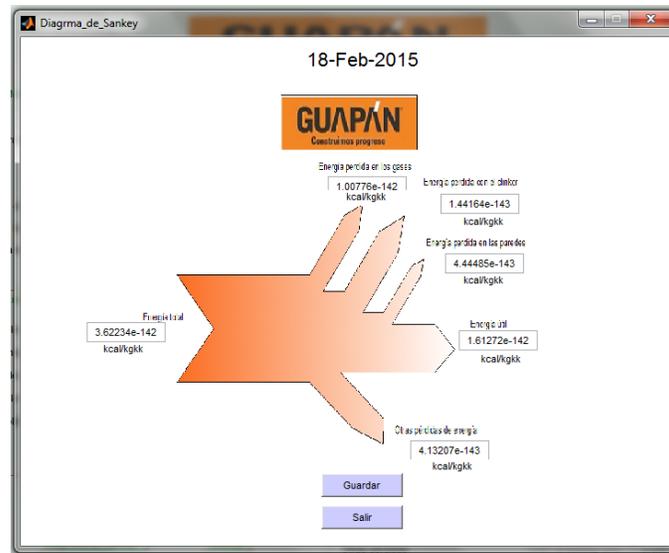
Botón Guardar: Guarda todos los datos obtenidos en el documento de Excel de nombre Resultados. Su codificación se muestra en el Anexo XXVI.XXI.

Como se ve en la codificación, se guarda toda la información como una matriz y luego escribe dicha matriz en una hoja de Excel con nombre de la fecha actual. La información debe ser guardada en una matriz, debido a que si se la guarda dato por dato, el programa se demora demasiado en cumplir con lo el propósito de este botón.

Botón Diagrama de Sankey: Cuando se presiona este botón se puede visualizar el diagrama de Sankey, en la ventana Diagrama_de_Sankey. La codificación de este botón es sencilla y se la puede observar en el Anexo XXVI.XXII.

4.2.6. Descripción de los botones de la ventana Diagrama_de_Sankey:

Muestra el diagrama de Sankey con los resultados obtenidos en la pantalla anterior. La pantalla se ve así:



Gráfica N°16: Ventana de resultados del diagrama de Sankey de la herramienta

Fuente: El autor

La codificación antes de que se abra la ventana se encuentra detallada en el Anexo XXVI.XXIII.

Lo que se hace es colocar a la ventana en el centro de la pantalla, para luego cargar la imagen del diagrama de Sankey, después agrupar a los resultados del balance de energía de la siguiente manera:

Perdidas de calor en las paredes: Calor de convección y radiación en el precalentador, horno y enfriadora.

Pérdidas de otras formas de energía: Calor en el polvo de arrastre, calor sensible del aire residual, calor de evaporación del agua y otros.

Para finalmente mostrar en los static text las unidades de los resultados y en los edit text los resultados.

En cuanto a botones se pueden ver 2 botones: salir y guardar

Botón Guardar: Este botón guarda la imagen obtenida diagrama de Sankey como una imagen. Su codificación se encuentra en el Anexo XXVI.XXIV.

Lo que hace este botón es guardar la imagen de la pantalla, para luego obtener la dirección actual que se usa para llegar al programa, después cambia esa dirección para que esté dentro de la carpeta Sankey, donde se guardarán las imágenes obtenidas (al mismo tiempo que se abre una ventana con la imagen) y se vuelve



nuevamente a la carpeta donde se encuentra el programa y se usa la última función close para cerrar la figura de matlab que se abre al guardar la imagen.

4.3. Función Guardar y Cargar en el programa.

Guardar datos: Para guardar los datos para la realización de un balance, se puede seleccionar la pestaña “Abrir” ubicada en la parte superior de la ventana de balmc (donde se escriben los datos), y seleccionar la opción “Base de datos”, lo cual abrirá el documento de Excel llamado “Base de datos”, donde se pueden escribir los datos en la hoja “hoja de muestra”, donde se encuentra un botón que dice “Aplicar formato” y se crea una pestaña con el nombre de la fecha actual con los datos escritos y se guarda normalmente. Otra opción para abrir esta base de datos desde el programa es con el atajo “Ctrl+D”.

Guardar resultados: Para guardar resultados simplemente se da un click en el botón Guardar en la ventana “ventana1” (donde se presentan los resultados). Esto se guarda en el archivo de Excel “Resultados” en una pestaña con el nombre de la fecha actual. Aquí los datos se mostrarán sin un formato, pero si se desea aplicarlo, dentro del documento de Excel hay un botón que dice “Aplicar formato”, la cual dará el formato preestablecido en la primera hoja del documento. Para revisar los valores obtenidos desde el programa se puede seleccionar la pestaña “Abrir” ubicada en la parte superior de la ventana de ventana1 (donde se presentan los resultados), y seleccionar la opción “Resultados”, lo cual abrirá el documento de Excel llamado “Resultados”. Otra opción para abrir este documento desde el programa es con el atajo “Ctrl+R”.

En caso de que al momento de guardar el documento, aparezca un mensaje de error que ponga:

“Advertencia sobre confidencialidad: este documento contiene macros, controles ActiveX, información sobre paquetes de expansión XML o componentes web. Estos pueden incluir información personal que no se puede quitar por el inspector del documento.”

El programa no podrá continuar a menos que dicha ventana sea cerrada. Para evitar estas molestias se debe abrir el documento de Excel y abrir el botón de office, dar click en Opciones de Excel, luego escoger Centro de confianza, para luego dar click en la opción Configuración del centro de confianza... e ir a la pestaña Opciones de privacidad y quitar el recuadro marcado en donde dice: Quitar información personal de las propiedades del archivo al guardarlo.

Guardar Diagrama de Sankey: Para guardar esta imagen simplemente se da un click en el botón Guardar en la ventana “diagrama de Sankey” (donde se presenta



la gráfica de Sankey). Esto se guarda en la carpeta “Diagrama de Sankey”, como una imagen de formato jpg. Para abrir la carpeta desde el programa se puede seleccionar la pestaña “Abrir” ubicada en la parte superior de la ventana de diagrama de sankey (donde se presentan los resultados), y seleccionar la opción “Diagrama de Sankey”, lo cual abrirá la carpeta. Otra opción para abrir ésta, desde el programa, es con el atajo “Ctrl+S”.

Cargar datos: Para cargar los datos para la realización de un balance, de una composición potencial o de los módulos, se puede simplemente escribir el nombre de la pestaña que contiene los datos en la hoja de Excel y se presiona el botón Cargar en cualquiera de ventanas que contienen este botón y se llenarán los espacios con los datos necesarios.

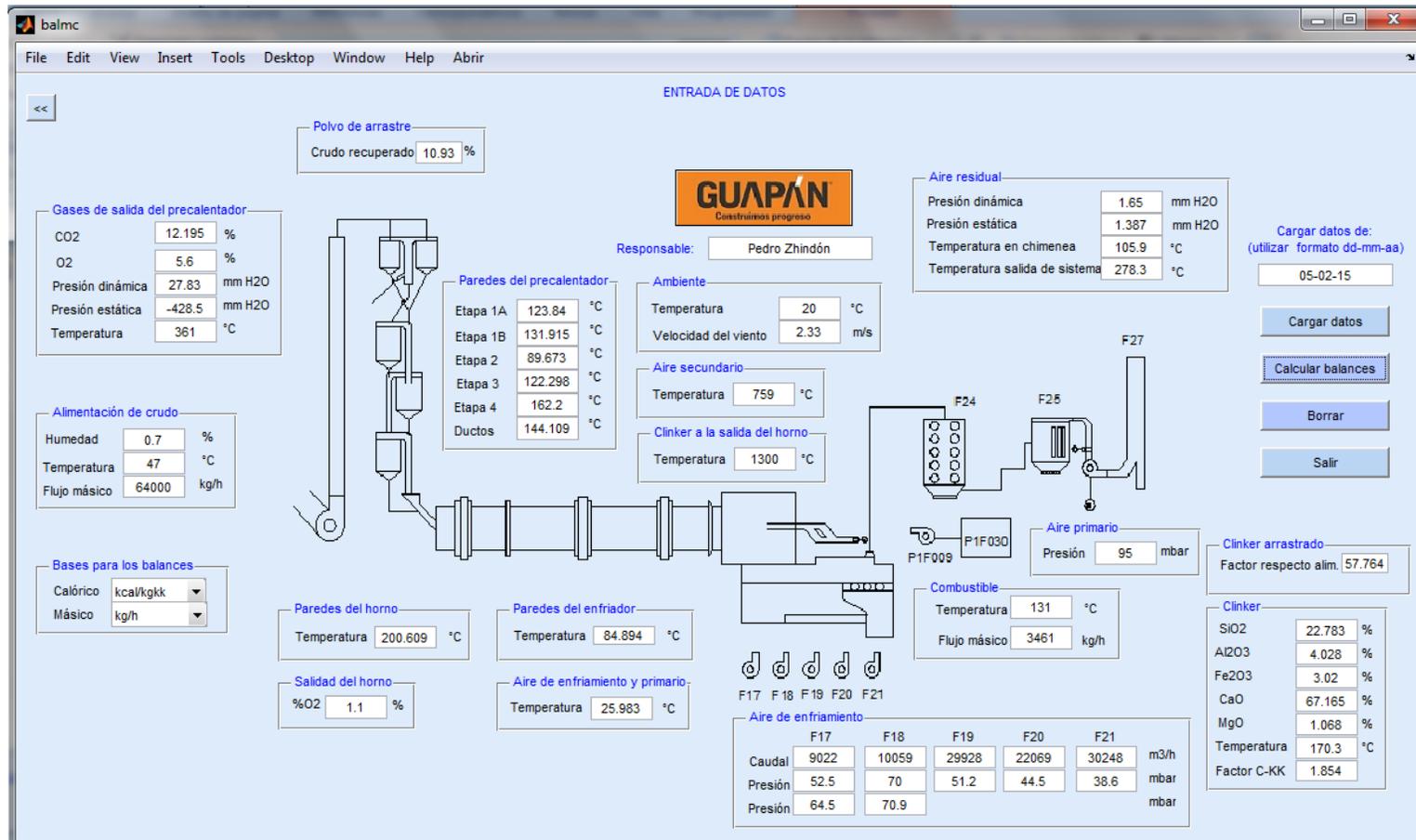
4.4. Diagrama de Sankey

En el diagrama de Sankey los valores de las energías no tienen la misma división, sino para que sea más agradable visualmente (no se amontonen los datos) se juntan algunos calores, así:

- Pérdidas en las paredes por radiación y convección= Pérdidas por radiación y convección en el enfriador, pérdidas por radiación y convección en el horno, pérdidas por radiación y convección en el pre-calentador.
- Energía útil= Calor de reacción
- Energía en los aire residuales= Calor sensible del aire residual
- Energía del Clinker= Calor sensible del Clinker, calor sensible del polvo de Clinker
- Energía de los gases de salida= Calor sensible de los gases de salida, calor sensible del polvo de crudo, calor de evaporación del agua.
- Energía perdida por otros= Otras pérdidas

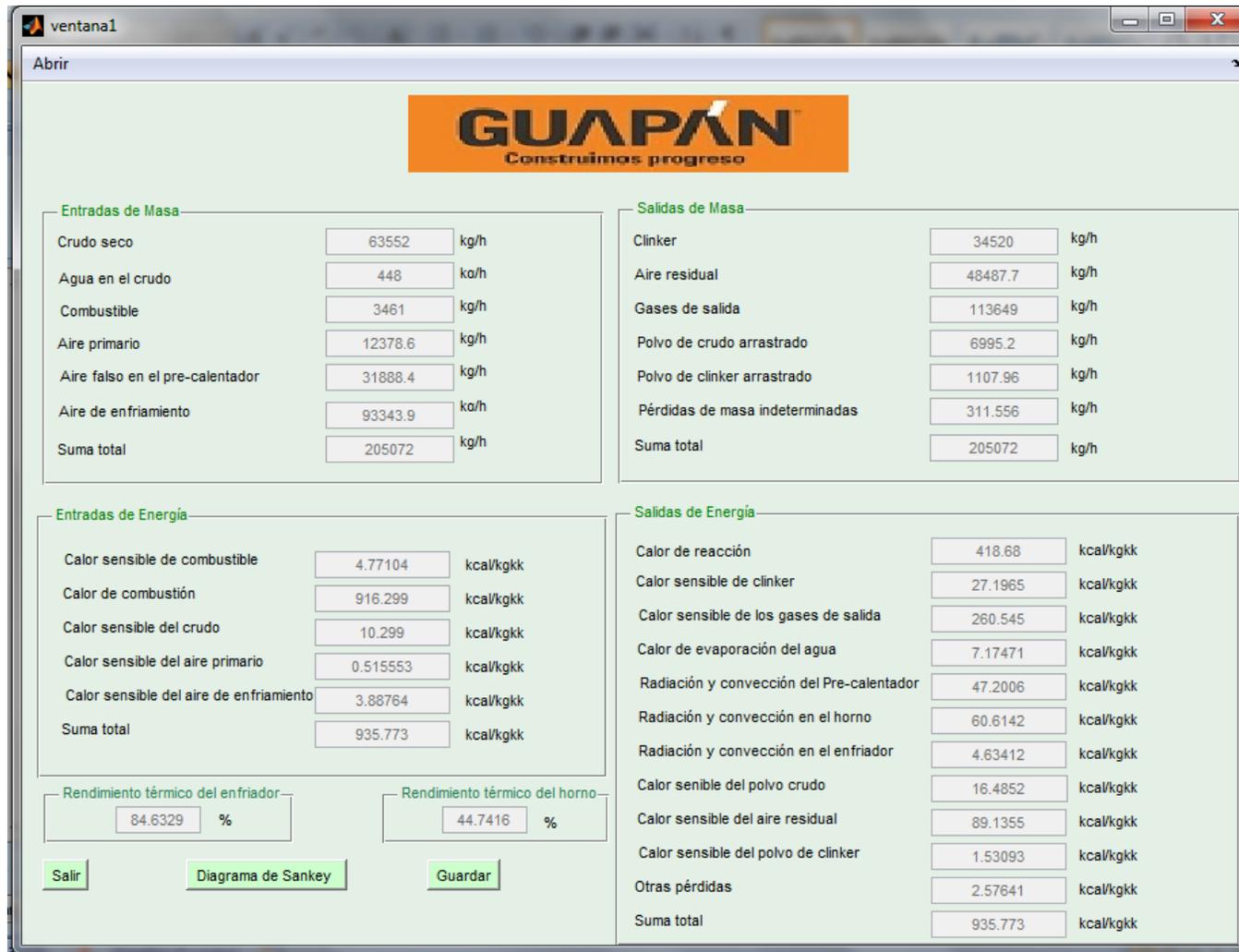
4.5. Resultados obtenidos por el programa

Con los primeros datos (05-02-15):



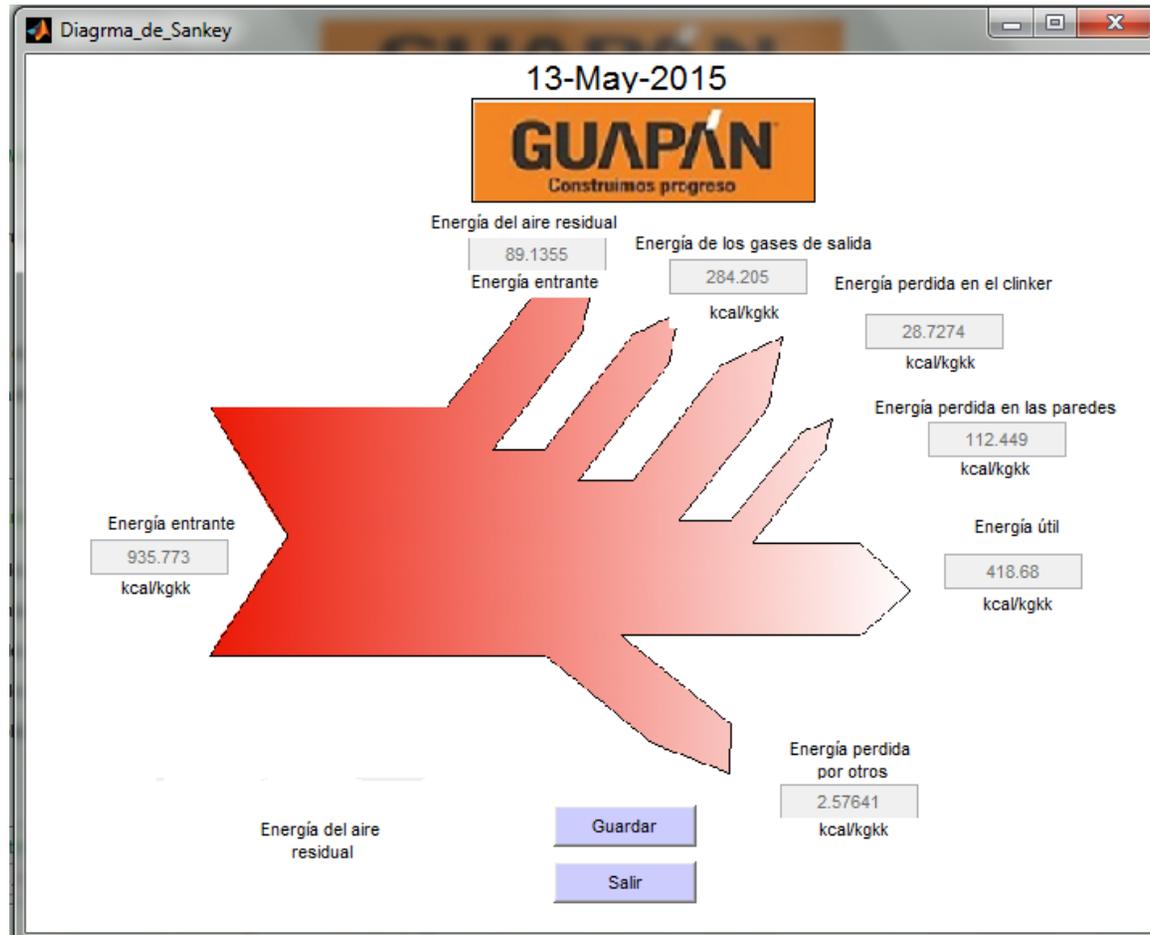
Gráfica N°17: Ventana de datos de la fecha 05-02-15

Fuente: El autor



Gráfica N°18: Ventana de resultados de la fecha 05-02-15

Fuente: El autor

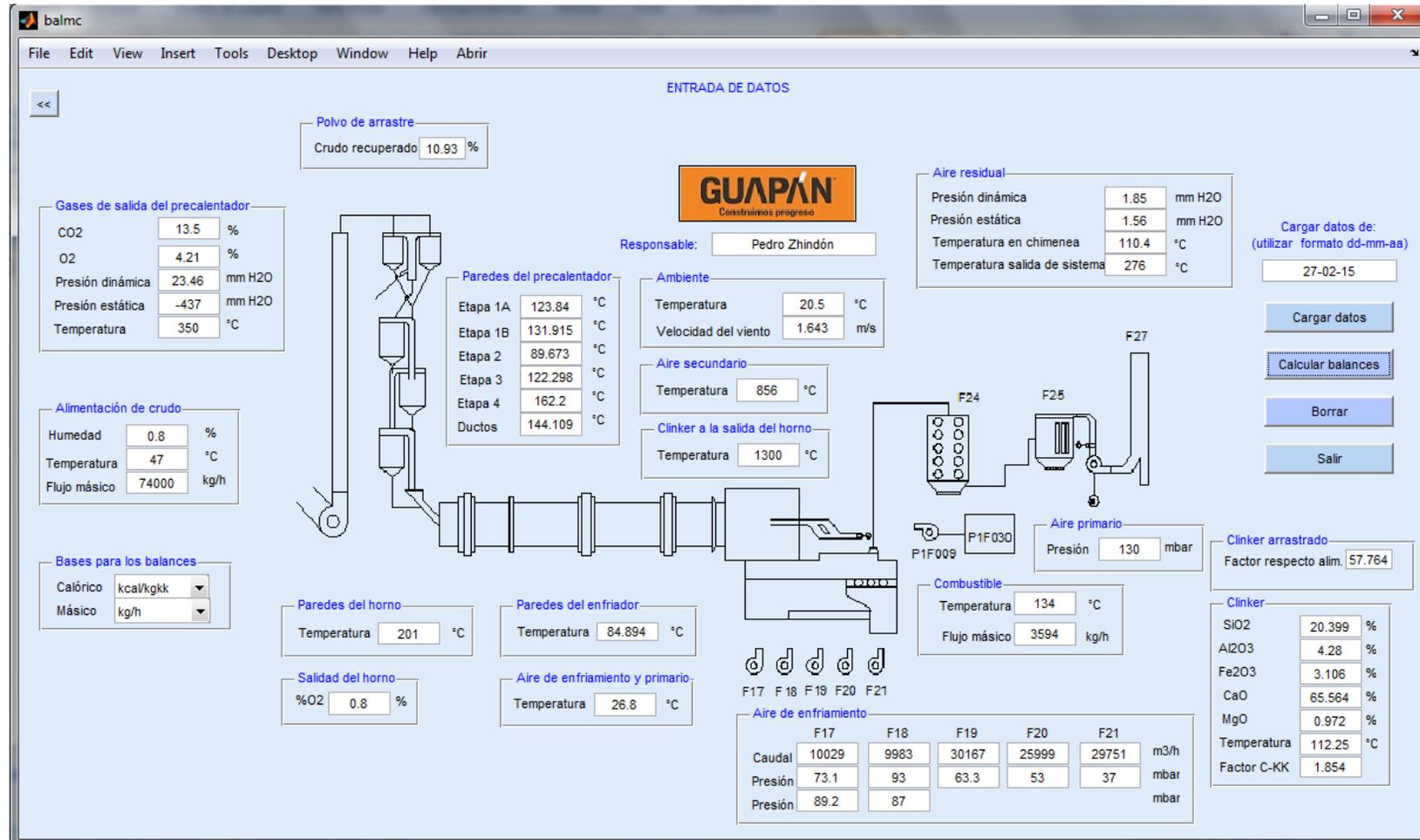


Gráfica N°19: Ventana de gráfica de resultados como diagrama de Sankey de la fecha 05-02-15

Fuente: El autor

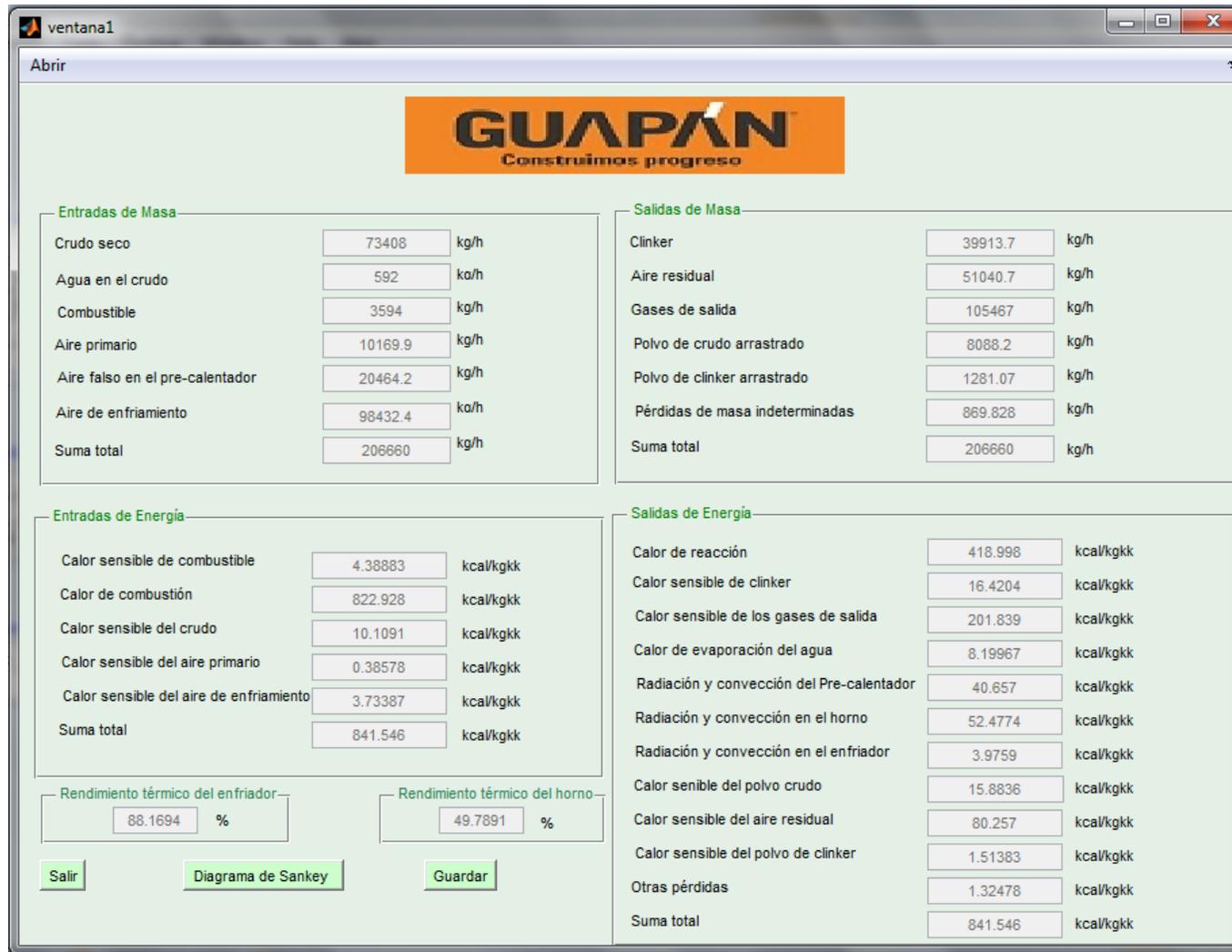


Con los otros datos (27-02-15):



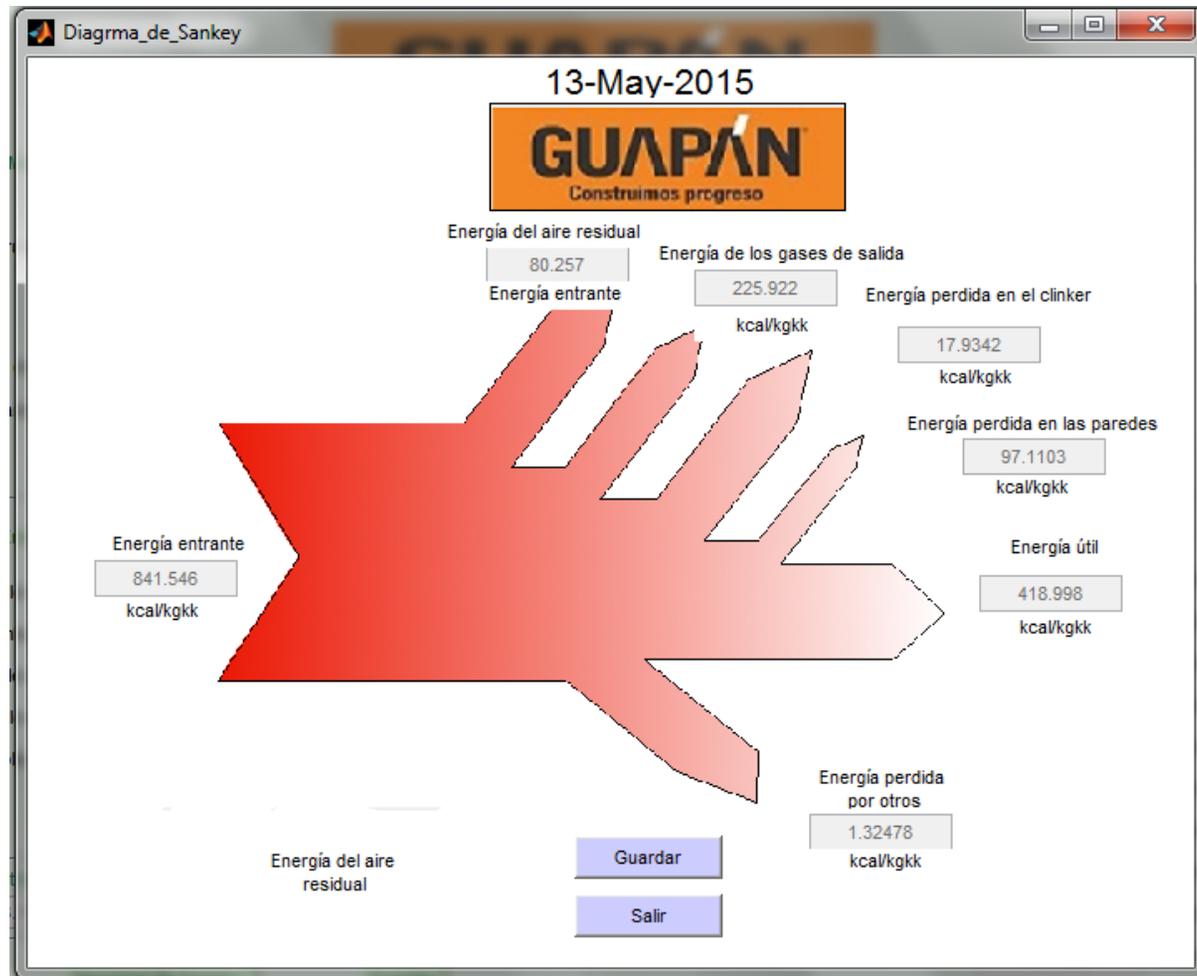
Gráfica N°20: Ventana de datos de la fecha 27-02-15

Fuente: El autor



Gráfica N°21: Ventana de resultados de la fecha 27-02-15

Fuente: El autor



Gráfica N°22: Ventana de gráfica de resultados como diagrama de Sankey de la fecha 27-02-15

Fuente: El autor



5. Análisis de los datos y resultados

Los datos de los que se disponen, fueron obtenidos en diferentes días, en los que se hizo algunas mejoras en el sistema, como el tapar un agujero que había en la parte inferior en la entrada del horno y pequeños agujeros para el aire falso en el pre-calentador, de allí que sus valores de consumo energético, sean tan diferentes.

Ahora, con respecto a los datos:

Todos los valores pueden ser comprobados de una manera u otra, de acuerdo a esto se ha comprobado que algunos de los datos medidos en el panel de control tienen ciertos errores. Estos errores no son tan grandes, sin embargo, deben ser corregidos, para una mayor exactitud en los datos. Entre los valores mencionados que más error presentan, están las temperaturas de los gases de salida, a la altura de la salida del pre-calentador y a la entrada del ventilador F4A, ambos tienen una diferencia con la medida cercana a 5°C, pero lo que delató este error, fue el hecho de que la temperatura a la salida del pre-calentador fuera un valor superior a la presentada por la temperatura a la entrada del ventilador F4A. Los datos presentados a continuación fueron datos medidos el 04 de diciembre del 2014:

Tabla 69

Resultados obtenidos al comparar la temperatura reportada en el panel de control con una medición directa

Punto de medida	Dato reportado en el panel (°C)	Dato medido (°C)
Salida del pre-calentador	365	370,3
Antes del F4A	373	367,4

Un dato, del cual no se tiene medida es el de la temperatura de salida del Clinker del enfriador, razón por la cual solo se pudo suponer este valor, debido a que los pirómetros ópticos disponibles en la fábrica no aceptaban tan altas temperaturas.

Otro dato que no se puede medir en la empresa es el de la velocidad del viento, debido a que, para la medición de esto se necesitaría de un aerómetro, del cual no se dispone en la empresa, pero se logra salvar esto, mediante el uso de internet, que nos da la velocidad del viento en la ciudad.

El caudal másico de crudo que ingresa al sistema, es el primero que da un indicio de que tan bien está funcionando el horno. El caudal de crudo puede ser mayor o menor, dependiendo si el horno alcanza o no la temperatura necesaria para que este se transforme en Clinker, si no lo hace se puede reducir este caudal, o



augmentar el caudal de combustible que ingresa al horno. Como se nota en los valores dados con anterioridad, en la primera fecha que se toman los datos, se tiene un funcionamiento del horno malo en comparación de la segunda fecha, pues al comparar los valores de caudal de crudo que ingresa, se sabe, de acuerdo al factor crudo Clinker, que el valor de producción de Clinker va a ser inferior de la primera fecha con respecto a la segunda.

El combustible es la principal fuente de calor que ingresa al sistema; como se indicó antes, para que el horno alcance la temperatura adecuada para el proceso, se puede aumentar su flujo y por ende el calor que ingresa al sistema. Pero al comparar los valores entre las dos fecha puestas a consideración se nota que el valor del combustible no cambia notoriamente, por lo que entre esas 2 fechas existe una mejoría, debido a que la cantidad de calor por kilogramo de Clinker que es producido, es menor en la segunda fecha.

De acuerdo a la bibliografía, se puede mejorar la eficiencia térmica reduciendo la cantidad de la corriente de aire primario. De acuerdo a esta ecuación, se puede tener un ahorro energético al bajar este valor, por ejemplo rebajando un 5% el aire primario.

$$\text{Ahorro en kcal/kg} = 0,002 \times Q_{\text{quemador}} \times \% \text{menos de aire primario}$$

Utilizando los valores para el primer conjunto de datos:

$$\text{Ahorro en kcal/kg} = 0,002 \times 935,179 \times 5\%$$

$$\text{Ahorro en kcal/kg} = 9,352$$

Lo cual en un balance horario no parecería demasiado, pero en uno diario o anual, si lo haría.

Afortunadamente el aire de enfriamiento se controla siempre desde el panel de control como caudal volumétrico. Los valores aquí obtenidos fueron confirmados antes de que se tomaran los valores.

En cuanto al aire secundario, los valores de esta corriente no son muy claros, por lo que para tener un dato de ésta lo más real posible, se recomendaría tener un valor más exacto del aire residual que sale del enfriador, de esta manera, con una simple resta se obtendría el valor del caudal de aire caliente que pasa al horno desde el enfriador.

El aire falso del sistema es notoriamente alto, a pesar de que disminuye de la primera fecha a la segunda, es claro que los valores de éstos son altos. Este aire disminuye la temperatura de los gases de salida del pre-calentador y recordando



que estos gases son los mismos que van a ayudar a calentar el material en el molino de crudo, se deberían reducir lo más pronto posible.

Por otro lado, el Clinker producido, es un valor que se obtiene por una relación de crudo Clinker, sin embargo, este valor podría variar, aunque sea ligeramente, por lo que debería ser verificado de una manera más seguida o por lo menos medido antes de realizar un balance. Además se debe aclarar, que para el cálculo del clinker, no se ocupa el mismo factor crudo Clinker ocupado en la empresa, esto se debe a que se necesita que el Clinker producido, sea dividido en dos corrientes para el balance térmico, por lo que el primer factor es uno y se usa otro para el Clinker arrastrado, debido a que el uno tiene una temperatura medida a la salida del enfriador, mientras que el otro una temperatura parecida a la de los gases de salida.

El aire residual es el valor que ayudará a decidir el caudal de aire que pasa como aire secundario, pero debido a que no se tiene un valor razonable a la salida de la chimenea del ventilador F27, se deduce que la cantidad de aires falsos en esta zona es alta, por lo que para tener el valor indicado correcto se necesitaría que el aire falso no exista en esta zona, o lo que resulta más sencillo, es solo crear un punto de muestra más cercana a la salida del aire residual.

Con respecto a los gases de salida del pre-calentador, se sabe que de éste se obtiene un valor de composición de los gases, sin embargo este valor es un valor porcentual en el que no se obtiene la cantidad de humedad que contienen dichos gases, pero debido a la pequeñísima cantidad de agua que hay en estos, no se tiene un error notable.

En cuanto al Clinker y el crudo arrastrados por los gases, son cantidades de material que siempre existirán, pero deberían ser disminuidos lo más posible y de preferencia comprobado antes de realizar un balance.

En cuanto al calor sensible del combustible no es un valor que varía demasiado (de acuerdo a lo observado en la planta), y no afecta demasiado al balance.

El calor de combustión es un valor que depende de la cantidad de combustible que ingresa al sistema, pero para que el consumo de energía en la planta sea mínimo se supondría bajar a la mínima cantidad de combustible necesario para que el calor que ingresa sea el mínimo necesario para producir un kg de Clinker, además de que el combustible tenga un buen poder calorífico, el cual es medido cada cierto tiempo en la empresa, con la bomba calorimétrica de otras instituciones.



Los calores proporcionados por el aire de enfriamiento, aire primario y el crudo son bajos, sin embargo no por eso se les desprecia.

En cuanto al calor de reacción se han obtenido mediante la fórmula de Zur Strasse, y tal como nos indica el Ing. Percy Castillo, no es un valor que varía demasiado de 420 kcal/kg de kk. Debido a que este es el valor que va a ser el único que participe en el rendimiento del sistema, junto con el calor total que es aportado a éste, el valor del rendimiento va a variar para mejor, cuánto menos energía entre a éste.

El calor sensible de los gases de salida se puede notar que es el valor de escape de energía más alto del sistema, razón por la cual es una energía que es reutilizada en otra zona del proceso de fabricación del cemento. Este calor variará dependiendo su temperatura, razón por la cual es imprescindible que se verifiquen los valores antes mencionados en este título. Además esta temperatura también afectará al calor de los polvos que han arrastrados y que pararán nuevamente en los silos de almacenamiento.

La evaporación del agua es otro uso de la energía que es ingresada al sistema, para esta se toma en cuenta solo el agua de crudo, porque el agua del combustible ya ocupa la energía de este (por esta razón se ocupa el PCI y no el PCS).

Las pérdidas por radiación y convección en los equipos son otros resultados, que en conjunto ocupan gran cantidad de energía que entra al sistema, que deben ser mejoradas.

En cuanto a los valores de calor en el aire residual y de polvo de Clinker, son valores que van a depender de la temperatura de los aires residuales. Esta temperatura es alta por lo que llego a considerar que tal vez, esta energía pueda ser ocupada para algo más.

Hay otra energía que se considera en las salidas de energía y es la de “otras pérdidas”. Se dice que para comprobar que un balance está bien hecho este valor no debe superar el 5% de la energía total. En el primer balance, el porcentaje de dichas pérdidas es del 0,73% y del segundo balance 0,11%.



6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Al conocer el proceso se puede notar con facilidad la pérdida de energía que se produce al realizar un enfriamiento de los aire residuales que salen del horno, debido a que, los aires podrían servir para calentar otra parte del proceso, por ejemplo, para que se caliente más el crudo en la molienda; además si se hace esto, se perdió dinero al realizar la instalación del equipo para este enfriamiento y no se utilizaría energía para la activación de los ventiladores para el intercambiador de calor.
- Al hacer las termografías (Anexo XXVII) en los ciclones del pre-calentador se puede apreciar, en los lugares de menor temperatura, por donde están entrando los aires falsos y por lo tanto estos lugares deben ser sellados, debido a que estos aires, no solo generan pérdidas de calor al sistema, sino que además obliga al ventilador de tiro a usar mayor potencia (aumenta las rpm de éste), y por lo tanto mayor consumo eléctrico.
- Al verificar la cantidad de aire falso que entra del sistema, se deduce que es imperativo realizar una campaña para la reducción de este aire, tapando orificios existentes en el sistema, debido a que el porcentaje de aire que ingresa es grande y puede producir los efectos antes mencionados.
- Otra zona que tiene graves problemas de aire falso es la zona del enfriamiento del aire residual.
- Cuando el molino está funcionando (todos los días laborables a excepción del Miércoles, debido a que este se detiene para mantenimiento, ese día), se utiliza los gases provenientes del pre-calentador para calentar al material en el molino de crudo, pero a mayor cantidad de aires falsos, más se enfrían los gases del pre-calentador, por lo que se podrá sacar menor provecho de esta energía para calentar al material proveniente del molino de crudo.
- El Clinker producido tiene una composición dentro de los límites establecidos para este tipo de cemento en cuanto a óxidos, lo que sugiere que el control del proceso de la planta está bien.
- En los balances se refleja que las mayores pérdidas de energía que se dan en el sistema se deben a: la energía perdida en los gases de escape del pre-calentador, en la convección y radiación de los equipos (más específicamente en el pre-calentador y en el horno) y el aire residual proveniente del enfriador, en ese orden, por lo que, para disminuir el consumo calórico se deben reducir especialmente estos 3 valores.
- Mientras más aire en exceso es ingresado al sistema, mayor será cantidad de gases de salida que deben salir por el pre-calentador y por lo tanto la composición de volumen de esta corriente tendrá mayor porcentaje de nitrógeno y oxígeno.



- La herramienta informática resulta de gran ayuda, debido a que estos cálculos se realizarían en 1 o 2 horas a mano y con la posibilidad de cometer algún error, sin embargo con esta herramienta se lo podría realizar en uno o dos minutos y con bajísimas probabilidades de error. De esta manera se incentivaría su uso en la empresa y se obtendrían datos de una manera casi inmediata. Además como es capaz de realizar los cálculos para los módulos y la composición potencial del Clinker, puede ayudar a motivar a que se controlen también los módulos que no son revisados dentro de ésta.
- La herramienta permite que se ingresen los datos con las unidades con los que éstos son reportados dentro de la planta, lo cual agiliza el proceso, al evitar cálculos de transformación de unidades. Y todo esto facilita el uso de la herramienta permitiendo a todos usarla, solo con los datos tomados dentro de la planta.
- Mediante el registro de los datos se puede ir comparando la eficiencia del proceso mes tras mes (o la frecuencia en la que se realice el balance) e ir determinando cuales son las posibles causas de mejora o pérdida del rendimiento del proceso dentro del sistema.
- El diagrama de Sankey que se puede obtener en el programa, ayuda a una mejor visualización de los resultados obtenidos, de una manera simple y puede ayudar a determinar rápidamente donde se encuentran las principales pérdidas de energía en el proceso.
- La cantidad de calor que egresa del sistema como calor de radiación y convección es alta en el pre-calentador (si se compara con las pérdidas típicas de calor mencionadas con anterioridad en la descripción de las corrientes de energía si los equipos deberían perder en radiación y convección cerca de 25 kcal/h frente a pérdidas de 40 ó 47 kcal/h); existe la posibilidad de que esté desgastado el material del equipo y por lo tanto se recomienda hacer alguna inspección a este.
- Como se nota en los dos balances que se han propuesto, los valores de energía varían bastante (la energía consumida baja de 935.179 a 840.934 kcal/ kg de kk); la razón se podría deber a que el sistema se encuentra más aislado en la segunda toma de datos, necesitando por lo tanto, menos cantidad de energía para calentar al sistema y debido a que la mayor parte de energía que ingresa al sistema es por el combustible que entra, este valor también disminuye con respecto a la cantidad de Clinker producido (la masa de combustible baja de 0.097 kg de combustible/ kg de Clinker a 0,087 kg de combustible/ kg de Clinker). Esto repercutirá en gran medida en el rendimiento térmico del horno, porque el calor útil que está ocupando el sistema es siempre cercano a 420 kcal/kg de kk (debido a que este dependerá básicamente solo de la composición del clinker), mientras que el



calor total varía básicamente de acuerdo a la cantidad de combustible que ingresa al sistema.

- Según lo explicado en el apartado anterior, si el aire primario es reducido, se puede aumentar el rendimiento térmico, porque al estar a una temperatura ambiente necesitará de más energía para ser calentado que lo que necesitaría el aire secundario que ya tiene una temperatura más elevada, por lo tanto, si se usa la mínima cantidad de aire primario necesaria, se usa menos energía para el calentamiento.

6.2. Recomendaciones

- Los gases de salida del pre-calentador, son difíciles de medir debido a que la presión dinámica sufre grandes cambios, además no se puede medir en el mismo sitio que se mide la velocidad de los gases, la composición de este, sino que los balances se hicieron suponiendo que este punto tendrá la misma composición que en el punto pasado el ventilador de tiro F4A, por lo que es recomendable primero, crear un punto de muestreo en el que sea factible realizar todas las mediciones necesarias.
- Se recomienda que el proceso de pesaje del Clinker obtenido en la producción se realice de una manera más seguida, en especial, antes de generar un nuevo balance, para que los datos sean más exactos.
- Se recomienda que antes de realizar los balances se haga una verificación del estado de los equipos, en especial de las termocuplas de algunas partes del sistema, como por ejemplo, de aquella termocupla ubicada en la entrada del ventilador F4A, de lo que ya se habló en el apartado anterior.
- Es más recomendable que los balances dentro de la empresa se realicen en un periodo que sea definido, con un grupo de trabajadores también definido; es decir que se establezca un plan para su realización, de manera que se puedan tomar los datos necesarios en el menor tiempo posible y con la disponibilidad de que la toma de muestras se realice sin interferir en otras labores. Esto se recomienda porque se puede dejar para después otras mediciones, pero esto podría producir errores, debido a que el sistema puede perder condiciones de estabilidad.
- Para el cálculo del rendimiento térmico del enfriador, se sugiere que se recupere el pirómetro para la medición de la temperatura a la que sale el Clinker del horno, debido a que como se especificó antes, se hizo una suposición de esta temperatura, para realizar el cálculo anterior.
- Se recomienda que exista un punto de muestreo para la determinación de masa de aire primario que ingresa al sistema, porque si bien se tiene una referencia de acuerdo a la gráfica proveniente del proveedor, se desconoce el grado de error que tiene dicha gráfica frente a la realidad. Luego este gráfico puede ser usado para una validación.



Bibliografía

- Cabezas, R. M. (2013). *Epoch*. Recuperado el 11 de noviembre de 2014, de "DISEÑO DE UN CRUDO QUE PERMITA LA UTILIZACIÓN DE NEUMÁTICOS USADOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN LA EMPRESA CEMENTO CHIMBORAZO":
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2507/1/96T00187.pdf>
- Carraza., I. J. (Enero de 2014). *Industrias Guapán*. Recuperado el 08 de Noviembre de 2014, de Determinación de partículas totales en fuentes fijas de combustión:
<http://www.industriasguapan.com.ec/imágenes/uploads/File/MIEM-0133-14.pdf>
- Construmática. (s.f.). *Construmática*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2014, de Clinker:
<http://www.construmatica.com/construpedia/Clinker>
- Definición abc. (s.f.). *Definición de cemento*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Definición abc: <http://www.definicionabc.com/general/cemento.php>
- Departamento de Mantenimiento Mecánico, COMPAÑÍA INDUSTRIAS GUAPÁN. (2008). *UPS*. Recuperado el 26 de Octubre de 2014, de Capitulo II. Proceso de producción del cemento:
http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/938/6/Capitulo_2.pdf
- EcuRed. (s.f.). *EcuRed*. Recuperado el 02 de Enero de 2015, de
http://www.ecured.cu/index.php/Herramientas_inform%C3%A1ticas
- Fernandez, I. J. (s.f.). *utn*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Máquinas térmicas:
http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf
- FLSmith Institute. (2002). *Asocem*. Recuperado el 06 de Enero de 2015, de Balances térmicos sobre sistemas de hornos (parte teórica):
http://www.asocem.org.pe/bivi/sa/cur/fls/HorSis/balances_termicos.pdf
- Francis, W. (1969). *Los combustibles y su tecnología* (Primera ed.). Urmo.
- Guerrero, D. O. (25 de Mayo de 2008). *Matpic*. Recuperado el 02 de Febrero de 2015, de Manual de interfaz gráfica de usuario en Matlab:
https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/11/MATLAB_GUIDE.pdf
- Labahn/Kohlhaas. (1985). *Google books*. Recuperado el 13 de 01 de 2015, de Prontuario del cemento:
https://books.google.com.ec/books?id=9UO8F9deluwC&pg=PA185&lpg=PA185&dq=porque+salen+negativos+los+resultados+de+la+formula+de+bogue&source=bl&ots=PbC0ccwGU4&sig=kB1ecd6lTw1Szz3VTrVW54xsQ4&hl=es&sa=X&ei=3s4qVdm1BeffsAST5oHYBw&redir_esc=y#v=onepage&q=porq
- Lloret, F. (2012). Balance de masa y energía en el horno rotativo. Cuenca, Azuay, Ecuador.



Lloret, F. (2012). *Química del cemento, procesos de trituración y prehomogenización*. Cuenca, Azuay, Ecuador.

Lloret, F. (2012). *Tecnología de cementos*. Cuenca, Azuay, Ecuador.

Lozano, A. V. (1987). Recuperado el 23 de Octubre de 2014, de Los balances de Energía, Entropía, exergía y energía libre: [file:///C:/Users/usuario/Downloads/ar13_a13\(cp0026\).pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/ar13_a13(cp0026).pdf)

Neira, I. P. (s.f.). *Combustión industrial*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Manual Práctico de Combustión y Clinkerización:
http://www.combustionindustrial.com/MANUAL_PRACTICO_DE_COMBUSTION_Y_CLINKERIZACION.pdf

Nergiza. (27 de Junio de 2013). *Nergiza*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2014, de Radiación, Conducción y Convección:Tres formas de transferencia de calor : <http://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>

Taborda, J. M. (2009). *Scrbd*. Recuperado el 25 de Enero de 2015, de Evaluación del consumo calórico en la producción de clinker en un horno rotatorio vía seca a partir de un análisis basado en balances de masa y energía: <http://es.scribd.com/doc/99727238/Analisis-Calorico-de-Produccion-de-Clinker-de-Cemento-Mediante-Balances-de-Masa-y-Energia#scribd>

Tacilla Araujo Elmer John, A. B. (22 de Diciembre de 2004). *Scribd*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Composición Química Del Cemento:
<http://es.scribd.com/doc/24863679/Composicion-Quimica-Del-Cemento>

Tecnifan. (s.f.). *Tecnifan*. Recuperado el 06 de Enero de 2015, de Generalidades sobre ventiladores:
http://www.tecnifan.es/inicio/ES/04_Informacion_general_de_productos/documentos/Generalidades%20sobre%20ventiladores.pdf

Uniovi. (s.f.). Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Lección 11. Cementos/módulos. Saturación en Cal.:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion11.CEMENTOS.Modulos.FormulasCal.B.pdf>

Uniovi. (s.f.). Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Lección 23. Cocción del cemento:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/LECCION23.Proceso.COCCION.pdf>

Uniovi. (s.f.). Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Lección 1. Cemento Portland. Generalidades:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.CementoPortland.GENERALIDADES.B.pdf>

Wikipedia. (02 de Junio de 2013). *Wikipedia*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Robert Herman Bogue: http://es.wikipedia.org/wiki/Robert_Herman_Bogue



Wikipedia. (17 de Octubre de 2014). *Wikipedia*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Cemento Portland: http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento_Portland

Wikipedia. (21 de Octubre de 2014). *Wikipedia*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Ley de Stefan Boltzmann: http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Stefan-Boltzmann

Wikipedia. (03 de Marzo de 2014). *Wikipedia*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2014, de Convección: <http://es.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3n>

Wordpress. (s.f.). Recuperado el 11 de Noviembre de 2014, de Definición y elaboración del cemento: <http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>



Anexo I

Fotos de los equipos

- **Tubo de pitot y manómetro**



- **Testo**



- **Termocupla**



- **Pirómetro**





Anexo II

Unidades de interés

- **Presión**

$$1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ atm} = 10332,274528 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ atm} = 1,033 \text{ kg/cm}^2 = 1,033\text{E}4 \text{ kg/m}^2$$

- **Temperatura**

$$K = ^\circ\text{C} + 273,15$$

- **Densidad**

$$\rho_{\text{aire a } 0^\circ\text{C y } 1 \text{ atm}} = 1,2929 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{gas}} = \frac{P}{RT}$$

De donde:

$$R = \frac{848 \frac{\text{kg m}}{\text{kmol K}}}{\text{Peso atómico o molecular del gas kg/kmol}}$$

T= temperatura en K

P= presión en kg/m^2



Anexo III

Cálculo de la presión barométrica en la ciudad de Azogues

Altura de la ciudad sobre el nivel del mar: 2590 m

Tabla 70

Descripción de presiones barométricas a las alturas límites cercanas a la altura de Azogues.

Altura (m)	Presión barométrica (mmHg)
2400	569
2600	556

Fuente: <https://books.google.com.ec/books?id=bjkwg-nBRzUC&pg=PA261&lpg=PA261&dq=2400+569+2600+556&source=bl&ots=EVhXOSKxXr&sig=xo1bDRfW42XV0Aeo1Azsydo9Ues&hl=es&sa=X&ei=KXMYVYwC7PisQTnuIKwBA&ved=0CCAQ6AewAA#v=onepage&q=2400%20569%202600%20556&f=false>

De acuerdo a la ecuación de la recta se tiene que:

$$P_b = \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) (x - x_2) + y_2$$

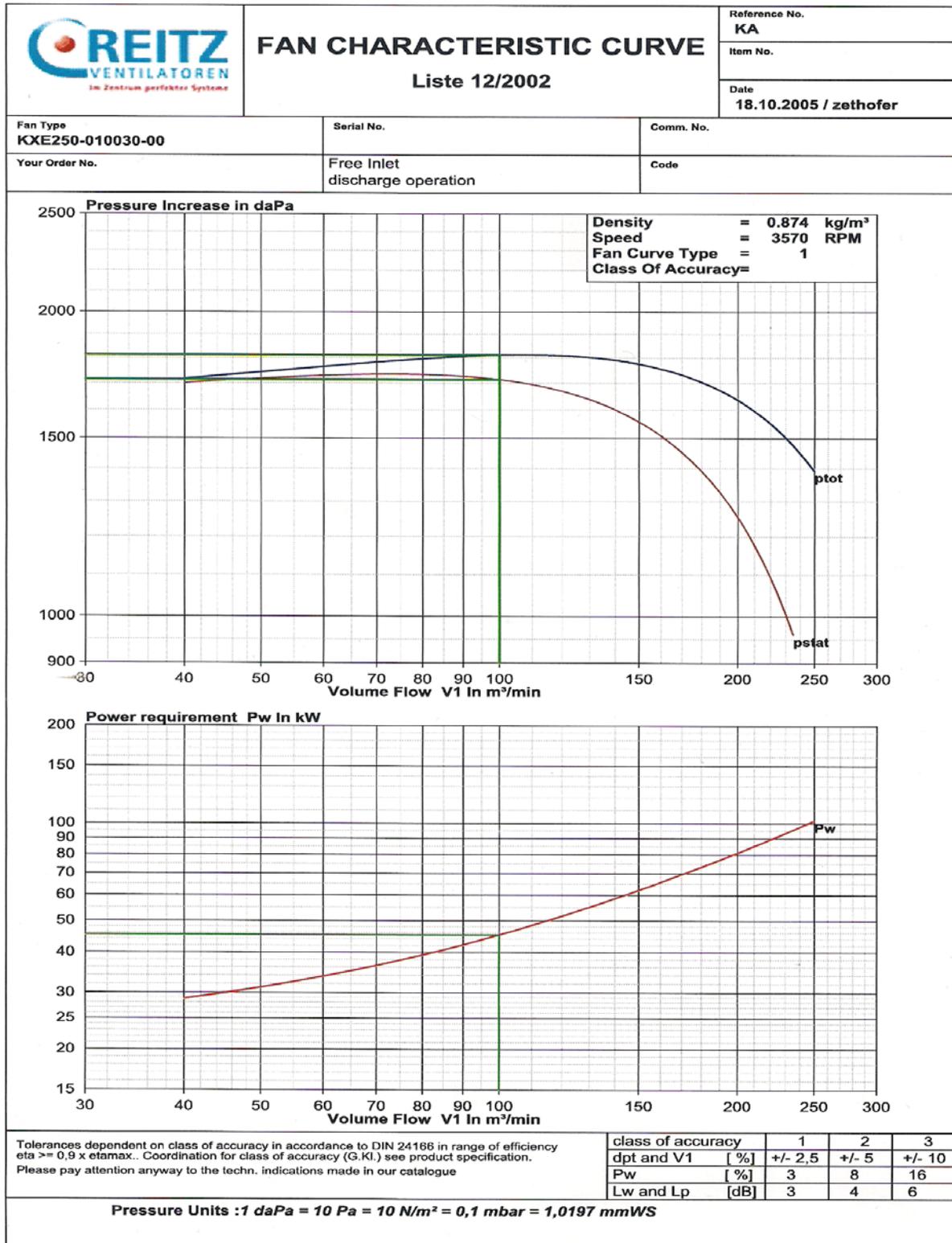
$$P_b = \left(\frac{569 - 556}{2400 - 2600} \right) (2590 - 2400) + 569$$

$$P_b = 556,65 \text{ mmHg}$$



Anexo IV

Gráfica 23: Curva características del ventilador F31





Anexo V

Para los siguientes cálculos se utilizan la fórmula de densidad de los gases y el valor de la constante universal de los gases descrito en el Anexo II.

Densidad del O₂ en condiciones normales:

$$\rho_{O_2} = \frac{P}{RT}$$

$$\rho_{O_2} = \frac{1.033E4}{\frac{848}{32} \cdot 273}$$

$$\rho_{O_2} = 1,428 \text{ kg/m}^3$$

Densidad del CO₂ en condiciones normales:

$$\rho_{CO_2} = \frac{P}{RT}$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{1.033E4}{\frac{848}{44} \cdot 273}$$

$$\rho_{CO_2} = 1,963 \text{ kg/m}^3$$

Densidad del N₂ en condiciones normales:

$$\rho_{N_2} = \frac{P}{RT}$$

$$\rho_{N_2} = \frac{1.033E4}{\frac{848}{28} \cdot 273}$$

$$\rho_{N_2} = 1,249 \text{ kg/m}^3$$

Anexo VI

VI.I. Creación de pestañas de menú en una ventana

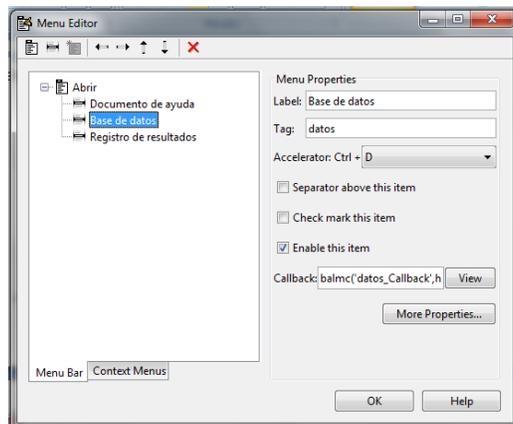
Es posible, en este programa, crear pestañas, de manera que asemejen a una barra de herramientas de Word, para esto en la barra de herramientas se puede elegir el botón Menu Editor, mostrado a continuación:



Gráfica N°24: Barra de herramientas (botón Menu editor)

Fuente: programa Matlab

Para crear un menú se selecciona el botón New 137tem y luego se pueden ir poniendo sub-menús mediante el botón new137137tem137137tem y se puede modificar las propiedades que se encuentran a un lado, pudiendo incluso crear “atajos” para determinada acción, por ejemplo Ctrl+D para abrir el documento de Datos. En la parte de Label se escribe lo que se quiere que se vea y en tag se escribe el nombre con el que Matlab identificará a esa pestaña y debe cumplir con las reglas de las variables de Matlab, es decir, no pueden haber espacios, ni tildes, etc.



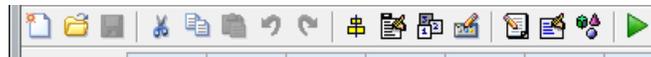
Gráfica N°25: Ventana de Menu editor

Fuente: programa Matlab

Y en la parte view se codifica lo que quiere que dicho menú o sub-menú haga.

Para probar si la aplicación funciona o no se la hace correr con el botón Run Figure:





Gráfica N°26: Barra de herramientas (botón Run figure)

Fuente: programa Matlab

VI.II. Alinear

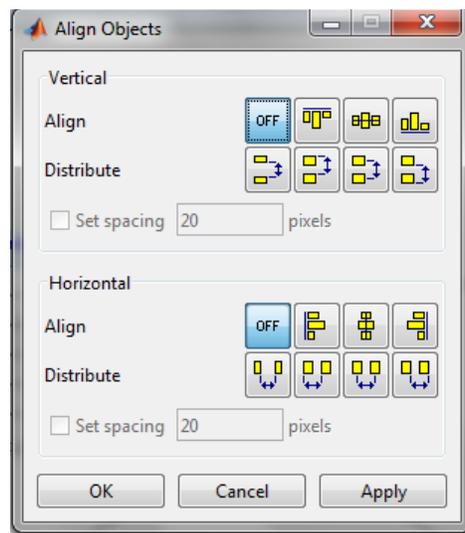
Para que la herramienta se vea estéticamente bien, se puede usar la opción alinear que también se muestra en esta misma barra, llamada alinear, la cual permite que los botones se alineen a una determinada distancia, ya sea en posición vertical u horizontal.



Gráfica N°27: Barra de herramientas (botón align)

Fuente: programa Matlab

Y aparecerá una ventana que se ve así:



Gráfica N°28: Ventana Align Objects

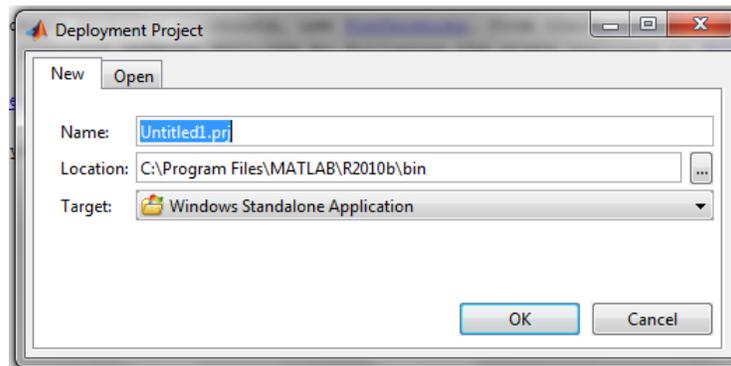
Fuente: programa Matla

En donde se selecciona la opción que mejor convenga para cada alineación. Para esto se debe haber seleccionado previamente los elementos a alinear.

VI.III. Creación de un ejecutable mediante Matlab

Este programa debe ser capaz de funcionar incluso en computadoras en donde no se disponga del programa mencionado; es decir se debe obtener un ejecutable del mismo.

Para esto se recurre a una función más en Matlab: `deploytool`. Escribiendo esta función, aparecerá un cuadro en la pantalla, en el que se mostrará:

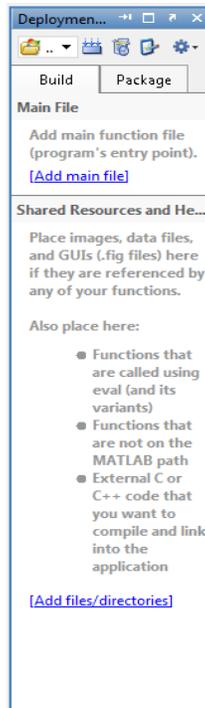


Gráfica N°29: Ventana para creación de un ejecutable

Fuente: programa Matlab

En la parte de nombre se coloca el nombre que se desea que tenga esta aplicación, en el caso de esta herramienta, se la ha llamado “balance”, mientras que en la parte que pide que se coloque la ubicación, esta es colocada antes de nombrar al programa, debido a que si el programa no encuentra un programa en la ubicación actual, se mostrará un mensaje de error y se deberá volver a iniciar.

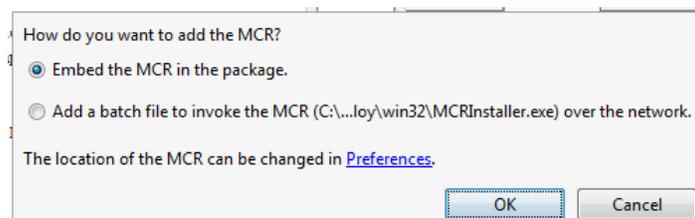
A continuación se selecciona el botón OK y la pantalla de Matlab se muestra ahora, así:



Gráfica N°30: Ventana de Deployment tool

Fuente: programa Matlab

De esta parte la que nos interesa ahora es la ventana de deployment tool (ubicada en la parte derecha de la pantalla), la cual está dividida en 2 partes, para lo cual, a la primera se debe arrastrar el documento principal, que en este caso es la ventana creada de nombre balmc. En cuanto a la parte que pide otros documentos secundarios se coloca todos los documentos relacionados con el documento principal, tales como las otras guis (interfaz gráfica del usuario), así como los otros documentos que se encuentren nombrados o sean llamados desde este documento. Luego se debe pasar a la pestaña Package, para luego poner la opción Add MCR, lo cual ayuda a que el programa pueda funcionar incluso en computadoras que no dispongan del programa de Matlab, y aparecerá una pantalla como esta:

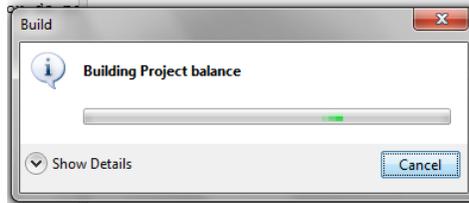


Gráfica N°31: Mensaje al seleccionar Add MCR

Fuente: programa Matlab



En la cual solo se selecciona aceptar para que nuestro programa tenga dentro de sí este MCR. Ahora se selecciona package, en los botones de arriba y se guarda con el nombre deseado, en este caso el nombre es el mismo que el que estaba antes, y se selecciona guardar y comenzará a construir el proyecto:



Gráfica N°32: Ventana de espera a construcción del proyecto

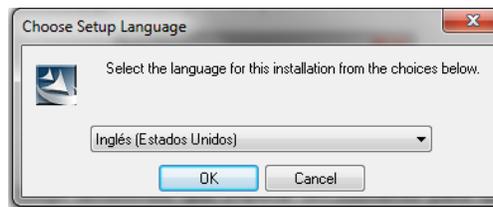
Fuente: programa Matlab

Para lo cual, luego se tendrá que esperar un momento para que la operación termine y se selecciona cerrar.

VI.IV. Instalación del proyecto en otra computadora

Ahora en cuanto a la instalación del proyecto en otra computadora:

Se entra en la carpeta donde se encuentra el archivo que se acaba de crear y se lo abre, y aparecerá este mensaje:



Gráfica N°33: Ventana de selección de idioma para la instalación de MCR

Fuente: programa Matlab

Este mensaje es para empezar la instalación del MCR, si es que ya se dispone de este programa en la computadora, se lo cancela, sin embargo si no lo tuviera, se deberían realizar los típicos pasos de instalación.

Luego se puede, ya, abrir el programa dentro de la computadora sin haber instalado Matlab antes.

Finalmente se debe colocar los archivos que se volverán a abrir desde el programa o fuera de este, estos incluyen: Manual (documento de Word), Datos (documento de Excel), Resultados (documento de Excel), Sankey (carpeta con imágenes), en la misma ubicación que el programa.



Anexo VII

Uso del calorímetro

- 1) Pesar la muestra en un envase de vidrio que es el proporcionado por el equipo.
- 2) Poner el envase en la base metálica que lo sostiene y colocar un pedazo de hilo que este en contacto con el combustible.
- 3) Colocar la base metálica en el envase metálico del equipo.
- 4) Insertar oxígeno dentro de este envase metálico.
- 5) Colocar la parte superior del envase en su lugar.
- 6) Asentar el envase metálico en el las tres bases del equipo, asegurándose de que la parte superior del envase, quede con la ranura en el lado izquierdo.
- 7) Agregar agua a la entrada del lado izquierdo del equipo.
- 8) Cerrar la tapa del espacio donde se depositó el envase de plástico de manera que coincidan las marcas en la parte superior del envase con los espacios salidos de la tapa.
- 9) Encender el equipo.
- 10) Insertar el peso de la muestra.
- 11) Esperar a que el equipo obtenga un resultado.
- 12) Una vez acabada la práctica se debe vaciar el aire contenido en el recipiente metálico y lavar el envase de vidrio que contenía la muestra.



Anexo VIII

Resultados obtenidos con la bomba calorimétrica

VIII.I. Resultado #1

Datos de la muestra:

Tipo de combustible: Fuel Oil #6

Fecha de toma de muestra: 22 de Octubre del 2014

Peso de la muestra usada en calorímetro: 0,2602 g

Los resultados devueltos por el equipo se muestran a continuación:

Tabla 71

Resultados devueltos por la bomba calorimétrica para la muestra #1

Acción	Tiempo (min)	Temperatura (°K)
Ecuación	0	20,6149 °C
-----	1	-0,0175
-----	2	-0,0044
-----	3	0,0025
Previo	4	0,0077
Principal	5	0,0121
-----	6	0,3018
-----	7	0,8913
-----	8	1,0588
-----	9	1,1215
-----	10	1,1482
-----	11	1,1606
-----	12	1,1672
-----	13	1,1707
Ensayo posterior	14	1,1734

Fuente: Tabla obtenida en el laboratorio de físico-química de la Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas

Finalmente el equipo nos devolvió el poder calorífico superior del combustible, cuyo resultado fue de:

$$\text{PCS} = 41755 \text{ J/g}$$

Que es lo mismo que

$$\text{PCS} = 41755 \text{ kJ/kg}$$



Y transformando a kcal/kg:

$$PCS = \frac{41\,755 \text{ kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{4,184 \text{ kJ}} = 9\,979,685 \text{ kcal/kg}$$

Se realizó otra prueba para estar seguro con los valores y este es el resultado de dicha prueba:

VIII.II. Resultado #2

Datos de la muestra:

Tipo de combustible: Fuel Oil #6

Fecha de toma de muestra: 28 de Noviembre del 2014

Peso de la muestra usada en calorímetro: 0,284 g.

Los resultados devueltos por el equipo se muestran a continuación:

Tabla 72

Resultados devueltos por la bomba calorimétrica para la muestra #2

Acción	Tiempo (min)	Temperatura (°K)
Ecualización	0	22,7269 °C
-----	1	0,2231
-----	2	0,2445
-----	3	0,2508
-----	4	0,2542
Previo	5	0,2571
Principal	6	0,2597
-----	7	0,5483
-----	8	1,2114
-----	9	1,4020
-----	10	1,4670
-----	11	1,4931
-----	12	1,5038
-----	13	1,5090
-----	14	1,5113
Ensayo posterior	15	1,512

Fuente: Tabla obtenida en el laboratorio de físico-química de la Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas

Finalmente el equipo devolvió el poder calorífico superior del combustible, cuyo resultado fue de:



$$PCS = 41\,806 \text{ J/g}$$

Que es lo mismo que

$$PCS = 41\,806 \text{ kJ/kg}$$

Y transformando a kcal/kg:

$$PCS = \frac{41\,806 \text{ kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{4,184 \text{ kJ}} = 9\,991,874 \text{ kcal/kg}$$

Si se hace un promedio de los valores obtenidos:

$$PCS = \frac{9\,991,874 + 9\,979,685}{2} = 9\,985,78 \text{ kcal/kg}$$

VIII.III. Cálculo del poder calorífico inferior (PCI)

Dada la composición del combustible (entregada por la empresa Guapán):

Tabla 73

Composición en porcentaje en peso del combustible

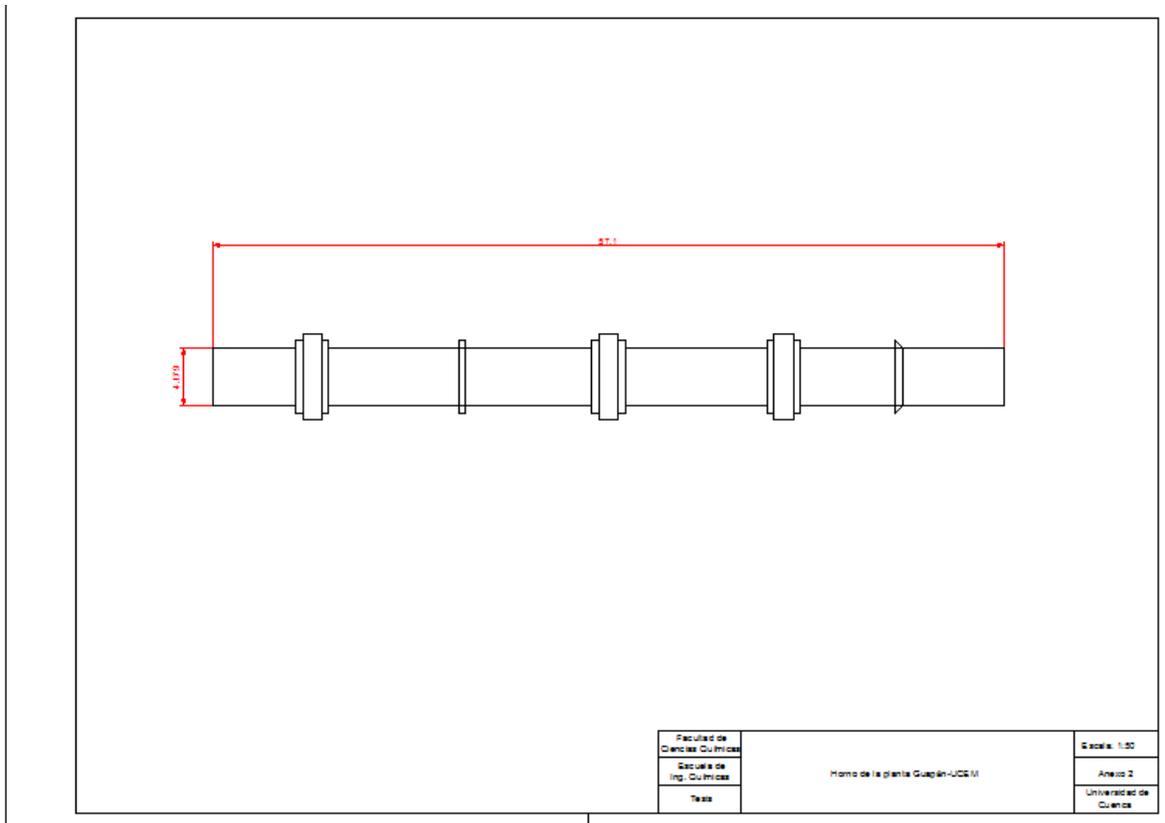
Composición del combustible	
%C:	85,6
%H:	10,4
%S:	1,786
%N:	0,5
%O:	0,25
%cenizas:	0,06
%agua:	0,1

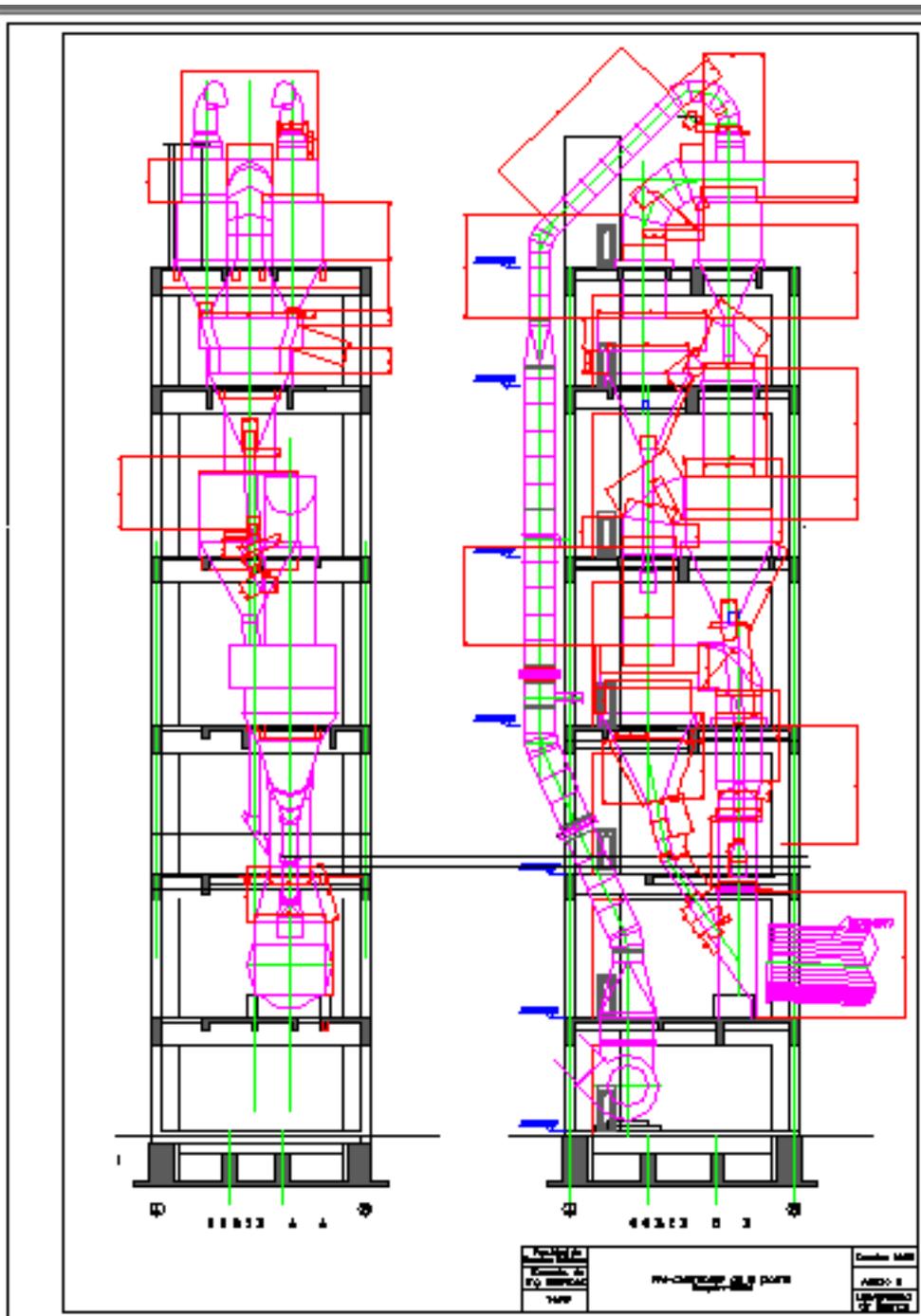
Fuente: Tabla entregada por el Jefe del departamento de Producción de la planta Guapán- UCEM

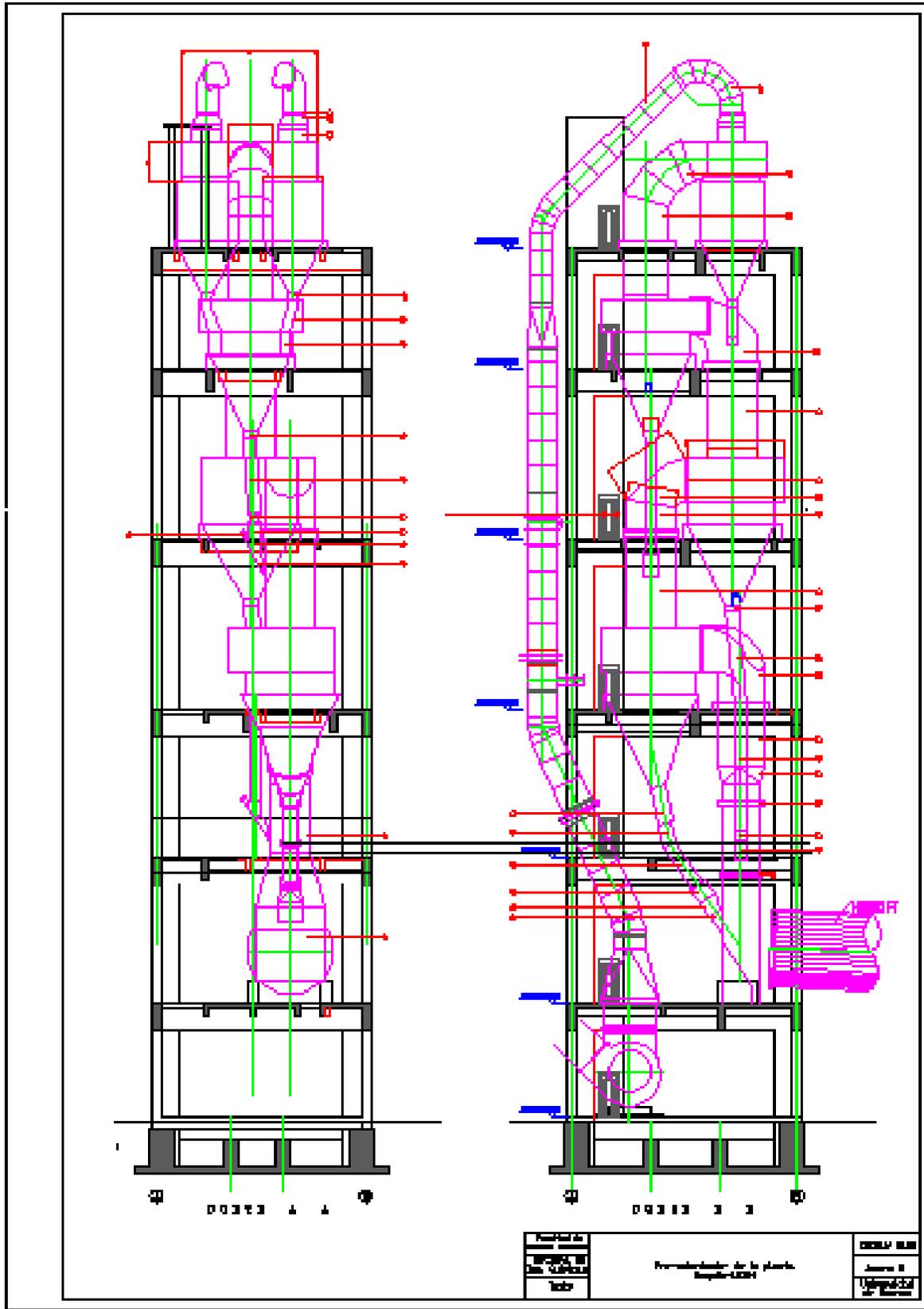
Se puede, ahora, calcular el poder calorífico del combustible con la fórmula antes indicada:

$$PCI = 9\,985,78 - 597(9 \times 0,104 + 0,001)$$

$$PCI = 9\,426,391 \text{ kcal/kg}$$









Anexo XII

Cálculo de las áreas del pre-calentador

XII.I. Cálculo de las áreas de los ciclones del pre-calentador

Área la primera etapa

$$A_{E1A} = \pi \times 3,45 \times 3,30 + \frac{\pi}{2} \cdot 3,26(3,45 + 0,7) + \pi \times 3,20 \times 2,35 + \frac{\pi}{4} \times (3,45^2 - 3,20^2)$$

$$A_{E1A} = 81,948 \text{ m}^2$$

Como la primera etapa consta de 2 gemelos de las mismas dimensiones:

$$A_{E1B} = 81,948 \text{ m}^2$$

Área la segunda etapa

$$A_{E2} = \pi \times 4,6 \times 1,30 + \frac{\pi}{2} \times 4,70(4,6 + 0,8) + \pi \times 6,10 \times 1,80 + \frac{\pi}{4} \times (6,10^2 - 4,60^2)$$

$$A_{E2} = 105,754 \text{ m}^2$$

Área la tercera etapa

$$A_{E3} = \pi \times 5,00 \times 1,3 + \frac{\pi}{2} \cdot 5,06(5,00 + 0,8) + \pi \times 5,50 \times 2,50 + \frac{\pi}{4} \times (5,50^2 - 2,50^2)$$

$$A_{E3} = 128,567 \text{ m}^2$$

Área la cuarta etapa

$$A_{E4} = \pi \times 5,00 \times 1,40 + \frac{\pi}{2} \cdot 1,80(5 + 3,74) + \pi \times 5,60 \times 2,50 + \frac{\pi}{4} \times (5,60^2 - 5,00^2) + \frac{\pi}{2} \times \left(\frac{3,48 + 4,05}{2} \right) (0,93 + 3,74)$$

$$A_{E4} = 122,536 \text{ m}^2$$

XII.II. Cálculo del área de los ductos del pre-calentador

1) Ductos para los gemelos:

Los ductos en la parte superior de los gemelos, tiene el área siguiente:

Para el tramo superior (sección 1), se considera esta parte como un cilindro:

$$A_1 = \pi \times D \times L$$



$$A_1 = \pi \times 1,70 \times 1,00$$

$$A_1 = 5,34 \text{m}^2$$

A la siguiente parte (sección 2) como un cono truncado recto:

$$A_2 = \frac{\pi}{2} g(D + d)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{2} 0,59(1,3 + 1,7)$$

$$A_2 = 2,78 \text{m}^2$$

A la siguiente (sección 3), una vez más como un cilindro:

$$A_3 = \pi \times 1,30 \times 0,10$$

$$A_3 = 0,408 \text{m}^2$$

Al siguiente tramo se lo considera como un toroide incompleto, y para calcular su área, se debe tomar en cuenta el área total, es decir el 100% del toroide y el ángulo que realmente ocupa y mediante una regla de 3 se puede decir cuál será su área.

Para esto primero se calcula cual va a ser el ángulo al que se debe tomar como referencia; para esto calculo mediante el seno de un triángulo recto.

$$\text{Sin}(x) = \frac{0,44}{0,63}$$

$$x = 44,3^\circ$$

A esto se le debe sumar los otros 90° .

$$X = 44,3 + 90 = 134,3^\circ$$

Y ahora el área total de una toroide va a ser:

$$A_{\text{Toroide}} = 4\pi^2 \times r \times a$$

$$A_{\text{Toroide}} = 4\pi^2 \times 1,25 \times 0,63$$

$$A_{\text{Toroide}} = 31,089 \text{m}^2$$

Pero como solo interesan los $134,3^\circ$:

$$A_4 = \frac{134,3 \times 31,089}{360} = 11,598 \text{m}^2$$

Y al último tramo (sección 5), también se lo considera como un cilindro:



$$A_5 = \pi \times 1,16 \times 9,98$$

$$A_5 = 36,37 \text{ m}^2$$

De donde el área total del ducto sería:

$$A_{\text{Total del ducto}} = 5,34 \text{ m}^2 + 2,78 \text{ m}^2 + 0,408 \text{ m}^2 + 36,37 \text{ m}^2 + 11,58 \text{ m}^2 = 56,478 \text{ m}^2$$

Como son 2 ductos:

$$A_{\text{Total de los 2 ductos}} = 56,478 \text{ m}^2 \times 2 = 112,956 \text{ m}^2$$

Para la tubería más ancha, que dirige el crudo a la siguiente etapa:

Para esta tubería se considera al primer tramo (sección 6) como un toroide de 90°:

$$A_{\text{Toroide}} = 4\pi^2 \times 1,25 \times 2,2$$

$$A_{\text{Toroide}} = 108,567 \text{ m}^2$$

Pero como solo nos interesan los 90°:

$$A_6 = \frac{90 \times 108,567}{360} = 27,141 \text{ m}^2$$

Y la siguiente parte (sección 7) como un cilindro truncado inclinado:

$$A_7 = \pi \times \left(\frac{6+5,4}{2} \right) \times 2,5$$

$$A_7 = 44,768 \text{ m}^2$$

Entonces el área total del ducto sería:

$$A_{\text{Total del ducto}} = 27,141 \text{ m}^2 + 44,768 \text{ m}^2 = 71,909 \text{ m}^2$$

Ahora, el área total de los ductos conectadas a la primera etapa:

$$A_{\text{Total de los ductos en la primera etapa}} = 112,956 \text{ m}^2 + 71,909 \text{ m}^2 = 184,865 \text{ m}^2$$

2) Ductos para la segunda etapa:

Para el ducto delgado que sale de esta etapa se considera a las secciones como un cono truncado recto y 2 cilindros (secciones 8, 9 y 10):

$$A_{\text{Total de la tubería}} = \frac{\pi}{2} 0,4(0,6 + 0,7) + \pi \times 0,5 \times 0,6 + \pi \times 1,37 \times 0,6$$

$$A_{\text{Total de la tubería}} = 4,342 \text{ m}^2$$

Y como se trata de 2 tubos que bajan desde la primera etapa, son 2, por lo tanto:



$$A_{Total\ de\ las\ 2\ tuberías} = 4,342\ m^2 \times 2 = 8,683\ m^2$$

Para el ducto ancho se toma como 2 secciones, la primera como una toroide cortada a 90° y un cilindro (secciones 11 y 12):

$$A_{Total\ del\ ducto} = \pi \times 6,1 \times 2,8 + 4\pi^2 \times 1,17 \times 1,218 \times \frac{90}{360}$$

$$A_{Total\ del\ ducto} = 67,723\ m^2$$

Ahora, el área total de los ductos conectados a la segunda etapa:

$$A_{Total\ de\ los\ ductos\ en\ la\ segunda\ etapa} = 8,683\ m^2 + 67,723\ m^2 = 76,406\ m^2$$

3) Ductos para la tercera etapa

Para el ducto delgado de la tercera etapa, tomamos a estas secciones como un cono truncado (sección 13), seguido otro cono truncado (sección 14), luego dos cilindros (secciones 15 y 16), luego otro cono trunco (sección 17) y luego como un cilindro truncado inclinado (sección 18), para acabar con un cilindro (sección 19).

$$A_{Total\ de\ la\ tubería} = \frac{\pi}{2} 0,5(0,8 + 0,69) + \frac{\pi}{2} 4,2(0,69 + 0,6) + \pi \times 0,49 \times 0,4 + \pi \times 1,06 \times 0,6 + \frac{\pi}{2} 1,08(0,85 + 0,37) + \pi \times 0,37 \times \frac{0,16+1,09}{2} + \pi \times 0,15 \times 0,8$$

$$A_{Total\ de\ la\ tubería} = 15,468\ m^2$$

Para el ducto ancho de esta etapa, se consideran a las secciones como un cilindro (sección 20), luego como un toroide incompleto (sección 21), luego como un cilindro trunco inclinado (sección 22), para terminar como un cilindro recto (sección 23).

Pero antes de eso se necesita saber cuál es el ángulo que tiene el toroide, para lo cual, utilizo la función tangente, que dice:

$$\tan(x) = \frac{0,72}{0,67}$$

$$x = 47,06^\circ$$

$$A_{Total\ del\ ducto} = \pi \times 0,1 \times 2,5 + 4\pi^2 \times 0,72 \times \frac{2,5+2,9}{4} \times \frac{47,06}{360} + \pi \times 2,90 \times \frac{1,7+1,2}{2} + \pi \times 2,8 \times 5,6$$

$$A_{Total\ del\ ducto} = 68,33\ m^2$$

Y el área total de los ductos para esta etapa sería:

$$A_{Total\ de\ los\ ductos\ en\ la\ tercera\ etapa} = 15,468\ m^2 + 68,33\ m^2 = 83,798\ m^2$$



4) Ductos para la cuarta etapa

Para el ducto delgado de la cuarta etapa, se toma como si se tratara de un cono truncado (sección 24), un cono truncado inclinado (sección 25), un cono truncado recto (sección 26), otro cono truncado (sección 27), y un cilindro (sección 28).

$$A_{Total\ del\ ducto} = \frac{\pi}{2} \times \frac{0,19+0,25}{2} (0,8 + 0,79) + \frac{\pi}{2} \times 5,22 \times (0,61 + 0,79) + \frac{\pi}{2} \times 6,8 \times (0,61 + 0,6) + \frac{\pi}{2} 0,61(0,6 + 0,8) + \pi \times 0,8 \times 1,2$$

$$A_{Total\ del\ ducto}=29,32\ m^2$$

Para el ducto ancho, dividido a este en secciones toroides (sección 29), cilindro (sección 30), cono truncado (sección 31), otro cilindro (sección 32) y otro cilindro más (sección 33):

$$A_{Total\ del\ ducto} = 4\pi^2 \times \frac{2,55}{2} \times 0,17 \times \frac{90}{360} + \pi \times 2,6 \times 5,3 + \frac{\pi}{2} \times 1,02(2,6 + 2,2) + \pi \times 0,3 \times 2,59 + \pi \times 2,2 \times 3,8$$

$$A_{Total\ del\ ducto}=81,826\ m^2$$

Y el área total de los ductos para esta etapa sería:

$$A_{Total\ de\ las\ ductos\ en\ la\ cuarta\ etapa}=29,32m^2+81,826\ m^2=111,146m^2$$

5) Ductos para la cámara de entrada al horno

Para el ducto delgado le divido en 4 secciones cilíndricas (secciones 34, 35, 36 y 37), una de cono truncado (sección 38) y otra de cilindro truncado inclinado (sección 39):

$$A_{Total\ del\ ducto}=\pi \times 2,2 \times 0,93 + \pi \times 1,28 \times 0,73 + \pi \times 0,73 \times 2,66 + \pi \times 0,9 \times 0,99 + \frac{\pi}{2} \times \frac{0,9+0,93}{2} (0,74 + 0,99) + \pi \times 0,74 \times \frac{1,26+0,2}{2}$$

$$A_{Total\ del\ ducto}=22,446m^2$$

Ahora con respecto a la cámara de entrada al horno (sección 40), se tiene el área siguiente:

$$A_{Cámara\ de\ entrada\ al\ horno}=\pi \times 2,2 \times 0,1 + (4 \times 4,2 + \frac{(2,3+4) \times 3,1}{2}) \times 4$$

$$A_{Cámara\ de\ entrada\ al\ horno}= 106,951m^2$$

Y el área total del ducto con la cámara de entrada:

$$A_{Total}=22,446m^2+106,951m^2=129,397m^2$$



Entonces para el área total de los ductos, se toma como medida a la suma de todas las áreas de los ductos con la cámara de entrada al horno.

$$A_{Ductos} = 184,865 \text{ m}^2 + 76,406 \text{ m}^2 + 83,798 \text{ m}^2 + 111,146 \text{ m}^2 + 129,397 \text{ m}^2 = 585,612 \text{ m}^2$$





Anexo XIV

Cálculo del área del enfriador

Para la boca de salida del clinker al enfriador (sección 1):

$$A_{lateral} = 977 \times 3100 + 977 \times 1163,649 + 977 \times 305,2425 + 3100 \times 2014 + \frac{2014 \times 1163,649}{2} + \frac{2014 \times 305,2425}{2} + 3100 \times 1356$$

$$A_{lateral} = 16389980,74 \text{ mm}^2$$

$$A_{frontal} = 977 \times 3724 + 2037 \times 3724 + 1356 \times 3724$$

$$A_{frontal} = 16273880 \text{ mm}^2$$

$$A_{trasera} = 977 \times 3724 + 2326 \times 3724 + 1356 \times 3724$$

$$A_{trasera} = 17350116 \text{ mm}^2$$

El área de la segunda parte inclinada del enfriador, es decir la parte por la que sale el aire residual (sección 2) es:

$$A_{superior} = 2084 \times 2900 = 6043600 \text{ mm}^2$$

$$A_{superior} = 802 \times 2900 = 2325800 \text{ mm}^2$$

$$A_{inferior} = 2467 \times 2900 = 7154300 \text{ mm}^2$$

Para obtener el área de las caras laterales de esta parte del enfriador se puede dividir a esta área en triángulos y como son 2 caras iguales se puede simplemente multiplicar por 2:

$$A_{caras laterales} = 2 \left(\frac{2675 \times 1155}{2} + \frac{2526 \times 1813}{2} + \frac{1500 \times 173}{2} \right)$$

$$A_{caras laterales} = 7928763 \text{ mm}^2$$

El área de la parte lateral recta del enfriador (sección 3):

$$A_{lateral} = 4706 \times 3100 = 14558600 \text{ mm}^2$$

El área de la parte superior del enfriador (sección 4):

$$A_{Parte superior del enfriador} = (14855 - 3724 - 2900) \times 3100$$

$$A_{Parte superior del enfriador} = 25516100 \text{ mm}^2$$



El área de la parte inferior del enfriador (sección 5):

$$A_{\text{Parte inferior del enfriador}} = (14855 - 2431) \times 3100 + 2431 \times 3100 + 1500 \times 3100$$

$$A_{\text{Parte inferior del enfriador}} = 50700500 \text{ mm}^2$$

El área de la parte posterior del enfriador (sección 6):

$$A_{\text{Parte posterior del enfriador}} = (14855 - 3724) \times 3190$$

$$A_{\text{Parte posterior del enfriador}} = 35507890 \text{ mm}^2$$

El área de la parte frontal y posterior del enfriador en la zona del triturador (sección 7):

$$A_{\text{Parte triturador del enfriador}} = 1500 \times 2431 \times 2$$

$$A_{\text{Parte triturador del enfriador}} = 7293000 \text{ mm}^2$$

El área de la parte frontal (sección 8):

$$A_{\text{Parte frontal}} = 3190 \times 7323 + 3190 \times 946 + 1444 \times 3724$$

$$A_{\text{Parte triturador del enfriador}} = 31755566 \text{ mm}^2$$

Entonces, el área total del enfriador sería:

$$A_{\text{Enfriador}} = 16389980,74 \text{ mm}^2 + 16273880 \text{ mm}^2 + 17350116 \text{ mm}^2 + 6043600 \text{ mm}^2 + 2325800 \text{ mm}^2 + 7154300 \text{ mm}^2 + 7928763 \text{ mm}^2 + 14558600 \text{ mm}^2 + 25516100 \text{ mm}^2 + 50700500 \text{ mm}^2 + 35507890 \text{ mm}^2 + 7293000 \text{ mm}^2 + 31755566 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Enfriador}} = 238798095,74 \text{ mm}^2 = 238,798 \text{ m}^2$$



Anexo XV

Cálculo de los diámetros

Diámetro de las etapas 1A y 1B

Para el cálculo del diámetro de los ciclones se han usado medias ponderadas con su longitud, mientras que la parte cónica ha sido tomada solo como el diámetro promedio entre el diámetro mayor y el menor, así.

$$D_{\text{Del cono}} = \frac{0,7+3,45}{2} = 2,075 \text{ m}$$

$$D_{\text{De la etapa 1A y 1B}} = \frac{2,32 \times 3,2 + 3,3 \times 3,45 + 3,4 \times 2,075}{3,2 + 3,45 + 3,4} = 2,574 \text{ m}$$

Diámetro de la etapa 2:

$$D_{\text{Del cono}} = \frac{0,8+4,6}{2} = 2,7 \text{ m}$$

$$D_{\text{De la etapa 2}} = \frac{6,1 \times 1,8 + 4,6 \times 1,3 + 2,7 \times 4,3}{4,3 + 1,3 + 1,8} = 3,861 \text{ m}$$

Diámetro de la etapa 3:

$$D_{\text{Del cono}} = \frac{0,8+5}{2} = 2,9 \text{ m}$$

$$D_{\text{De la etapa 3}} = \frac{5,5 \times 2,5 + 1,3 \times 5 + 2,9 \times 4,6}{2,5 + 1,3 + 4,6} = 3,999 \text{ m}$$

Diámetro de la etapa 4:

$$D_{\text{Del primer cono}} = \frac{5+3,74}{2} = 4,37 \text{ m}$$

$$D_{\text{Del segundo cono}} = \frac{0,93+3,74}{2} = 2,335 \text{ m}$$

$$L_{\text{Del segundo cono}} = \frac{4,06+3,48}{2} = 3,77 \text{ m}$$

$$D_{\text{De la etapa 4}} = \frac{5,6 \times 2,5 + 1,4 \times 5 + 4,37 \times 1,6 + 2,335 \times 3,377}{2,5 + 1,4 + 1,6 + 3,77} = 3,969 \text{ m}$$

Diámetro de los ductos:

$$D_{\text{Ducto 1}} = \left(\frac{1,7 \times 1 + 1,5 \times 0,55 + 1,3 \times 0,1 + 1,16 \times 9,98 + 1,26 \times (2\pi \times 1,88) \frac{134,3}{360}}{1 + 0,55 + 0,1 + (2\pi \times 1,88) \frac{134,3}{360} + 9,98} \right) = 1,234 \text{ m}$$

$$L_{\text{Ducto 1}} = 1 + 0,55 + 0,1 + (2\pi \times 1,88) \frac{134,3}{360} + 9,98 = 15,037 \text{ m}$$



Recordando que de este ducto, son 2 con las mismas medidas

$$D_{Ducto\ 2} = \frac{(2\pi \times (2,2 + 1,25)) \frac{90}{360} \times 2,5 + 2,5 \times \frac{6+5,4}{2}}{(2\pi \times (2,2 + 1,25)) \frac{90}{360} + \frac{6+5,4}{2}} = 2,5\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 2} = (2\pi \times (2,2 + 1,25)) \frac{90}{360} + \frac{6+5,4}{2} = 11,119\text{m}$$

$$D_{Ducto\ 3} = \left(\frac{0,7 \times 0,4 + 0,6 \times 0,5 + 0,6 \times 1,37}{0,4 + 0,5 + 1,37} \right) = 0,618\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 3} = 0,4 + 0,5 + 1,37 = 2,27\text{m}$$

Recordando que de este ducto, son 2 con las mismas medidas

$$D_{Ducto\ 4} = \frac{(2\pi \times (1,17 + \frac{2,8+2,07}{4})) \frac{90}{360} \times (\frac{2,8+2,07}{2}) + 2,8 \times 6,1}{(2\pi \times (1,17 + \frac{2,8+2,07}{4})) \frac{90}{360} + 6,1} = 2,661\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 4} = \left(2\pi \times \left(1,17 + \frac{2,8+2,07}{4} \right) \right) \frac{90}{360} + 6,1 = 9,85\text{m}$$

$$D_{Ducto\ 5} = \frac{0,745 \times 0,5 + 0,645 \times 4,2 + 0,49 \times 0,4 + 0,6 \times 1,06 + \frac{0,85+0,37}{2} \times 1,08 + 0,37 \times \frac{0,16+1,09}{2} + 0,15 \times 0,8}{0,5 + 4,2 + 0,4 + 1,06 + 1,08 + \frac{0,16+1,09}{2} + 0,15} = 0,614\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 5} = 0,5 + 4,2 + 0,4 + 1,06 + 1,08 + \frac{0,16+1,09}{2} + 0,15 = 8,015\text{m}$$

$$D_{Ducto\ 6} = \frac{2,5 \times 0,1 + \frac{2,5+2,9}{2} \times (2\pi \times (0,72 + 1,35)) \frac{47,06}{360} + 2,9 \times \frac{1,7+1,2}{2} + 5,6 \times 2,8}{0,1 + (2\pi \times (0,72 + 1,35)) \frac{47,06}{360} + \frac{1,7+1,2}{2} + 5,6} = 2,794\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 6} = 0,1 + (2\pi \times (0,72 + 1,35)) \frac{47,06}{360} + \frac{1,7+1,2}{2} + 5,6 = 8,85\text{m}$$

$$D_{Ducto\ 7} = \frac{\frac{0,8+0,79}{2} \times 0,22 + \frac{0,79+0,61}{2} \times 5,22 + \frac{0,6+0,61}{2} \times 6,8 + \frac{0,6+0,8}{2} \times 0,6 + 0,8 \times 1,2}{0,22 + 5,22 + 6,8 + 0,6 + 1,2} = 0,664\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 7} = 0,22 + 5,22 + 6,8 + 0,6 + 1,2 = 14,04\text{m}$$

$$D_{Ducto\ 8} = \frac{(2\pi \times (0,17 + \frac{2,8+2,07}{4})) \frac{90}{360} \times \frac{2,5+2,6}{2} + 2,6 \times 5,3 + \frac{2,2+2,6}{2} \times 1 + 2,59 \times 0,3 + 2,2 \times 3,8}{(2\pi \times (0,17 + \frac{2,8+2,07}{4})) \frac{90}{360} + 5,3 + 1 + 0,3 + 3,8} = 2,454\text{m}$$

$$L_{Ducto\ 8} = \left(2\pi \times \left(0,17 + \frac{2,8+2,07}{4} \right) \right) \frac{90}{360} + 5,3 + 1 + 0,3 + 3,8 = 12,579\text{m}$$

Área promedio de la parte superior de la cámara de entrada al

$$\text{horno} = \frac{2,3^2 + 4^2}{2} = 10,645$$



$$\text{Equivalente del diámetro de esta área} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 10,645}{\pi}} = 3,682\text{m}$$

$$\text{Equivalente del diámetro del área de la cámara de entrada al horno} = \sqrt{\frac{4 \times 4^2}{\pi}}$$

$$\text{Equivalente del diámetro del área de la cámara de entrada al horno} = 4,514\text{m}$$

$$D_{\text{Cámara de entrada al horno}} = \frac{0,1 \times 2,2 + 3,1 \times 3,682 + 4,2 \times 4,514}{0,1 + 3,1 + 4,2} = 4,134\text{m}$$

$$L_{\text{Cámara de entrada al horno}} = 0,1 + 3,1 + 4,2 = 7,4\text{m}$$

Entonces para el diámetro de toda los ductos tomaremos un valor de diámetro de:

$$D_{\text{Ductos}} = \frac{1,234 \times 15,037 + 1,234 \times 15,037 + 2,5 \times 11,119 + 0,618 \times 2,27 + 0,618 \times 2,27 + 2,661 \times 9,85 + 0,614 \times 8,015 + 2,794 \times 8,85}{15,037 \times 2 + 11,119 + 2,27 \times 2 + 9,85 + 8,015 + 8,85 + 14,04 + 12,579 + 7,4} + \frac{0,664 \times 14,04 + 2,454 \times 12,579 + 4,134 \times 7,4}{15,037 \times 2 + 11,119 + 2,27 \times 2 + 9,85 + 8,015 + 8,85 + 14,04 + 12,579 + 7,4}$$

$$D_{\text{Ductos}} = 1,826\text{m}$$

Diámetro del enfriador:

$$\text{Máxima área transversal del enfriador} = 16389980,74\text{mm}^2 = 16,39\text{ m}^2$$

$$\text{Mínima área transversal del enfriador} = 14558600\text{mm}^2 = 14,559\text{m}^2$$

$$\text{Área promedio} = \frac{16,39\text{ m}^2 + 14,559\text{m}^2}{2} = 15,47\text{m}^2$$

$$\text{Equivalente del diámetro de esta área} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 15,47}{\pi}} = 4,438\text{m}$$



Anexo XVI

Temperaturas de las etapas del pre-calentador

Tabla 74

Temperaturas de las etapas del pre-calentador

Datos de tomados el 15 de diciembre del 2014									
Etapas	°C	Promedio							
1 A	121,3	119,3	118,3	129,1					122,000
1 B	129,8	125,4	128,3	133,8					129,325
2	110,4	106,6	73,1	83,3	107,6	81,0	86,6	78,5	90,888
3	139,4	87,3	99,7	110,9	119,3	134,6	119,7	130,5	117,675
4	115,3	149,4	168,5	147,3	184,0	177,3	153,6	180,7	159,513
Datos de tomados el 16 de diciembre del 2014									
Etapas	°C	Promedio							
1 A	117,6	122,4	133,8	121,2					123,750
1 B	136,1	138,8	128,3	132,3					133,875
2	74,7	103,5	100,8	102,3	92,2	98,6	73,4	78,6	90,513
3	121,2	99,3	138,4	116,1	125,8	132,0	119,7	126,0	122,313
4	119,4	152,7	143,8	168,9	185,4	177,3	178,1	167,2	161,600
Datos de tomados el 17 de diciembre del 2014									
Etapas	°C	Promedio							
1 A	122,5	118,0	133,2	123,5					124,300
1 B	126,2	130,5	134,5	138,9					132,525
2	76,8	85,8	102,9	109,9	89,3	89,6	74,4	84,1	89,100
3	88,7	119,7	148,1	114,8	126,7	135,9	122,7	130,8	123,425
4	112,1	150,8	141,8	165,6	181,5	195,9	171,2	185,0	162,988
Datos de tomados el 18 de diciembre del 2014									
Etapas	°C	Promedio							
1 A	118,6	125,9	126,8	129,3					125,150
1 B	137,6	133,6	128,8	132,4					133,100
2	74,1	88,9	105,9	104,8	85,6	87,5	80,6	78,6	88,250
3	113,1	116,7	137,1	120,7	126,4	131,3	116,1	123,1	123,063
4	111,0	150,6	139,6	166,0	177,7	206,0	166,8	187,1	163,100
Datos de tomados el 19 de diciembre del 2014									
Etapas	°C	Promedio							
1 A	117,5	122,8	131,8	123,9					124,000
1B	127,6	130,9	133,6	130,9					130,750
2	81,7	86,5	104,1	106,3	86,1	92,9	80,3	79,0	89,613
3	123,5	110,5	124,1	138,5	128,8	132,6	117,6	124,5	125,013
4	117,6	147,5	171,5	141,4	177,0	162,4	186,8	206,2	163,800



Anexo XVII

Temperaturas en las paredes del enfriador

Tabla 75

Temperaturas del enfriador

Enfriador (°C)					
Fecha	15/12/2014	16/12/2014	17/12/2014	18/12/2014	19/12/2014
	40,200	41,600	43,600	47,000	46,100
	47,300	34,400	31,400	33,800	36,900
	32,800	45,500	44,100	46,400	46,000
	24,400	47,700	38,600	40,500	40,700
	29,900	25,300	32,100	24,000	26,500
	46,600	29,500	24,800	30,600	32,100
	33,200	33,400	33,000	32,800	32,500
	105,400	104,200	103,400	103,500	105,600
	82,000	81,300	82,600	84,200	83,100
	159,000	159,800	160,500	162,300	160,800
	156,000	156,400	159,300	153,100	151,700
	175,000	175,200	171,800	177,500	177,000
	169,500	170,000	170,900	170,600	171,100
Promedio	84,715	84,946	84,315	85,100	85,392



Anexo XVIII

Temperaturas en las paredes de los ductos del pre-calentador

Tabla 76

Temperaturas de los ductos en el pre-calentador (16/12/14)

Temperaturas de los ductos en °C								
	Tubería delgada		Tubería delgada		Tubería ancha		Colector de polvos	
Piso 7	57	47,8			74,8	92,2	146,3	129,6
Piso 6	84,6	147	101,6	130,4	67	84,4	175	165,6
Piso 5	225,4	173,2			84,4	116,1		
Piso 4	284,3	245,7			130,5	144,5		
Piso 3	284,5				208,9	162,2		
Temperatura promedio de las tuberías del pre-calentador para el 16/12/14							142,52	°C

Tabla 77

Temperaturas de los ductos en el pre-calentador (17/12/14)

Temperaturas de los ductos en °C								
	Tubería delgada		Tubería delgada		Tubería ancha		Colector de polvos	
Piso 7	60	45,5			75,1	96,6	145,6	135
Piso 6	88	143,3	98,6	126,6	67,3	85,6	175,3	165,2
Piso 5	217,7	184,1			128,3	119,6		
Piso 4	274,5	245,9			132,6	145,9		
Piso 3	283,3				209,7	165		
Temperatura promedio de las tuberías del pre-calentador para el 17/12/14							144,572	°C

Tabla 78

Temperaturas de los ductos en el pre-calentador (18/12/14)

Temperaturas de los ductos en °C								
	Tubería delgada		Tubería delgada		Tubería ancha		Colector de polvos	
Piso 7	58	43,1			72,2	94,8	146,6	135,2
Piso 6	88,2	146,6	103,2	69,5	79,5	91,3	174,1	167,7
Piso 5	212,5	182,7			182,7	129,5		
Piso 4	259,3	245,1			133	145,5		
Piso 3	287				206,8	187		
Temperatura promedio de las tuberías del pre-calentador para el 18/12/14							145,644	°C



Tabla 79

Temperaturas de los ductos en el pre-calentador (20/12/14)

Temperaturas de los ductos en °C								
	Tubería delgada		Tubería delgada		Tubería ancha		Colector de polvos	
Piso 7	58,6	43,6			73,3	94	148,1	136,4
Piso 6	72	135,9	146,4	88,6	80,9	92,4	178,4	168,5
Piso 5	215,1	184,7			118,8	118,8		
Piso 4	257,1	242,8			135	144,7		
Piso 3	287,3				208,9	162,2		
Temperatura promedio de las tuberías del pre-calentador para el 19/12/14							143,7	°C



Anexo XIX

Peso real del polvo de Clinker producido

Tabla 80

Peso real del polvo del Clinker producido y almacenado en el Hall:

Unidad	Peso bruto	Tara	Neto	Suma	Hora
y55	26660	13680	12980	36580	7H00
y44	24420	12520	11900		
y54	24330	12630	11700		
y44	26720	12520	14200	41420	8H00
y55	26750	13680	13070		
y54	26780	12630	14150		
y44	25470	12520	12950	36740	9H00
y55	25640	13680	11960		
y54	24460	12630	11830		
y44	25730	12520	13210	40990	10 H00
y55	28530	13680	14850		
y55	26610	13680	12930		
y55	25810	13680	12130	37370	11 H00
y55	25060	13680	11380		
y44	26380	12520	13860		
y55	27290	13680	13610	39790	12 H00
y44	25380	12520	12860		
y55	27000	13680	13320		
y44	25000	12520	12480	37450	13 H00
y55	26140	13680	12460		
y44	25030	12520	12510		
y55	24890	13680	11210	35910	14 H00
y44	24400	12520	11880		
y44	25340	12520	12820		
y44	23290	12520	10770	32090	15 H00
y55	26090	13680	12410		
y44	21430	12520	8910		
y55	27000	13680	13320	38770	16 H00
y55	25120	13680	11440		
y44	26530	12520	14010		
y55	26900	13680	13220	35100	17 H00
y44	23840	12520	11320		
y55	24240	13680	10560		
y44	25950	12520	13430	47700	18 H00



y55	32540	13680	18860		
y55	29090	13680	15410		
Total			459910		

Fuente: Tabla obtenida por el departamento de Producción de la planta Guapán- UCEM



Anexo XX

Cálculo de los módulos

Módulo Hidráulico

$$MH = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

$$MH = \frac{43,3}{13,86 + 2,29 + 2,191}$$

$$MH = 2,36$$

Módulo de silicio

$$MdS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

$$MdS = \frac{13,86}{2,29 + 2,191}$$

$$MdS = 3,09$$

Módulo silíceo

$$MS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3}$$

$$MS = \frac{13,86}{2,29}$$

$$MS = 6,05$$

Módulo de fundentes

$$MF = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

$$MF = \frac{2,29}{2,191}$$

$$MF = 1,045$$



Anexo XXI

Cálculo de la composición potencial del Clinker

$$C_4AF=3,04Fe_2O_3$$

$$C_4AF=3,04 \times 3,02=9,18$$

$$C_3A=2,65Al_2O_3-1,69Fe_2O_3$$

$$C_3A=2,65 \times 4,028-1,69 \times 3,02=5,57$$

$$C_2S=8,6SiO_2+1,08Fe_2O_3+5,07Al_2O_3-3,07CaO$$

$$C_2S=8,6 \times 22,783+1,08 \times 3,02+5,07 \times 4,028-3,07 \times 67,165=13,42$$

$$C_3S=4,07CaO -7,6SiO_2-1,43Fe_2O_3-6,72Al_2O_3$$

$$C_3S=4,07 \times 67,165 -7,6 \times 22,783-1,43 \times 3,02-6,72 \times 4,028=68,824$$



Anexo XXII

Cálculo de los flujos de masa

Los flujos de entrada y salida de masa a presentarse son para la fecha 05-02-15

Flujos de entrada de masa al sistema Pre-calentador-horno-enfriador

a) *Agua en el crudo*

Tabla 81

Datos para el cálculo del agua en el crudo

Datos			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo	64000	kg/h
hum	Humedad del crudo	0,7	%

$$m_{humedad} = m_{alim} \times \frac{hum}{100}$$

$$m_{humedad} = 64000 \times \frac{0,7}{100}$$

$$m_{humedad} = 448 \frac{kg}{h}$$

b) *Crudo seco:*

$$m_{crudo\ seco} = 64000 - 448$$

$$m_{crudo\ seco} = 63552 \frac{kg}{h}$$

c) *Combustible:*

Tabla 82

Dato del combustible

Datos			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidades
m_{comb}	Caudal másico de combustible	3461	kg/h



d) Aire de enfriamiento:

Tabla 83

Datos para el cálculo del aire de enfriamiento

Datos			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidades
Q_{F17}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F17	9022	m^3/h
Q_{F18}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F18	10059	m^3/h
Q_{F19}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F19	29928	m^3/h
Q_{F20}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F20	22069	m^3/h
Q_{F21}	Caudal volumétrico de aire de enfriamiento del F21	30248	m^3/h
P_{F17A}	Presión del aire de enfriamiento en el F17 en cámara A	52,5	mbar
P_{F17B}	Presión del aire de enfriamiento en el F17 en cámara B	64,5	mbar
P_{F18A}	Presión del aire de enfriamiento en el F18 en cámara A	70	mbar
P_{F18B}	Presión del aire de enfriamiento en el F18 en cámara B	70,9	mbar
P_{F19}	Presión del aire de enfriamiento en el F19	51,2	mbar
P_{F20}	Presión del aire de enfriamiento en el F20	44,5	mbar
P_{F21}	Presión del aire de enfriamiento en el F21	38,6	mbar
T_{aea1}	Temperatura del aire de enfriamiento y del aire de primario	25,983	°C
P_{atm}	Presión atmosférica	556,65	mmHg

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F17 en condiciones normales

$$Q_{o F17} = \frac{9022}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F17A}}{760} \right) + \frac{9022}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F17B}}{760} \right)$$

-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F17 en cámara A

$$P_{F17A} = \frac{52,5 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F17A} = 39,378 \text{ mmHg}$$

-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F17 en cámara B

$$P_{F17B} = \frac{64,5 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F17B} = 48,379 \text{ mmHg}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F17 en condiciones normales

$$Q_{o F17} = \frac{9022}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+39,378}{760} \right) + \frac{9022}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+48,379}{760} \right)$$

$$Q_{o F17} = 3230,294 \frac{m^3}{h} + 3279,077 \frac{m^3}{h}$$



$$Q_{o F17} = 6509,371 \frac{m^3}{h}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F18 en condiciones normales

$$Q_{o F18} = \frac{10059}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F18A}}{760} \right) + \frac{10059}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F18B}}{760} \right)$$

-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F18 en cámara A

$$P_{F18A} = \frac{70 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F18A} = 52,504 \text{ mmHg}$$

-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F18 en cámara B

$$P_{F18B} = \frac{70,9 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F18B} = 53,179 \text{ mmHg}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F18 en condiciones normales

$$Q_{o F18} = \frac{10059}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+52,504}{760} \right) + \frac{10059}{2} \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+53,179}{760} \right)$$

$$Q_{o F18} = 3680,904 \frac{m^3}{h} + 3684,983 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{o F18} = 7365,887 \frac{m^3}{h}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F19 en condiciones normales

$$Q_{o F19} = 29928 \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F19}}{760} \right)$$

-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F19

$$P_{F19} = \frac{51,2 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F19} = 38,403 \text{ mmHg}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F19 en condiciones normales

$$Q_{o F19} = 29928 \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+38,403}{760} \right)$$

$$Q_{o F19} = 21396,163 \frac{m^3}{h}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F20 en condiciones normales

$$Q_{o F20} = 22069 \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F20}}{760} \right)$$



-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F20

$$P_{F20} = \frac{44,5 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F20} = 33,378 \text{ mmHg}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F20 en condiciones normales

$$Q_{o F20} = 22069 \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+33,378}{760} \right)$$

$$Q_{o F20} = 15644,361 \frac{m^3}{h}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F21 en condiciones normales

$$Q_{o F21} = 30248 \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+P_{F21}}{760} \right)$$

-Cálculo de la presión del aire de enfriamiento en el F21

$$P_{F21} = \frac{38,6 \text{ mbar} \times 760 \text{ mmHg}}{1013,25 \text{ mbar}}$$

$$P_{F21} = 28,952 \text{ mmHg}$$

-Cálculo del caudal volumétrico del ventilador F21 en condiciones normales

$$Q_{o F21} = 30248 \left(\frac{273}{273+25,983} \right) \left(\frac{556,65+28,952}{760} \right)$$

$$Q_{o F21} = 21281,477 \frac{m^3}{h}$$

-Cálculo del caudal volumétrico de enfriamiento en condiciones normales

$$Q_{o \text{ enfriamiento}} = Q_{o F17} + Q_{o F18} + Q_{o F19} + Q_{o F20} + Q_{o F21}$$

$$Q_{o \text{ enfriamiento}} = (6509,371+7365,887+21396,163 +15644,361 +21281,477) \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{o \text{ enfriamiento}} = 72197,259 \frac{m^3}{h}$$

-Cálculo del caudal másico del aire de enfriamiento

$$m_{ae} = 72197,259 \frac{m^3}{h} \times 1,2929 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{ae} = 93343,836 \frac{kg}{h}$$



e) Aire primario

Tabla 84

Datos para el cálculo del aire primario

Datos			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$P_{\text{aire primario}}$	Presión manométrica del aire primario	95	mbar

-Cálculo de la presión del aire primario

$$P_{\text{aire primario}} = P_{\text{aire primario}} \text{ mbar} \times \frac{10 \text{ daPa}}{1 \text{ mbar}}$$

$$P_{\text{aire primario}} = 95 \text{ mbar} \times \frac{10 \text{ daPa}}{1 \text{ mbar}}$$

$$P_{\text{aire primario}} = 950 \text{ daPa}$$

-Cálculo del caudal volumétrico de aire primario

$$Q_{\text{Aire primario}} = \frac{143,438 \pm \sqrt{143,438^2 - 4 \left(-\frac{1584 - P_{\text{aire primario}}}{0,029} \right)}}{2}$$

$$Q_{\text{Aire primario}} = \frac{143,438 \pm \sqrt{143,438^2 - 4 \left(-\frac{1584 - 950}{0,029} \right)}}{2}$$

$$Q_{\text{Aire primario}} = 236,053 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 14163,184 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

De acuerdo a la gráfica aquí el aire tendría una densidad de $0,874 \text{ kg/m}^3$

$$m_{\text{Aire primario}} = Q_{\text{Aire primario}} \times \rho$$

$$m_{\text{Aire primario}} = 14163,184 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{Aire primario}} = 12378,623 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$



a) Aire falso

-Caudal másico de aire falso que ingresa al sistema (en esta sección aún no se calcula el caudal másico de gases a la salida del enfriador, por lo que se calcula el porcentaje de aire falso que ingresa y se usa el valor del caudal volumétrico de gases de salida del sistema)

$$X_{\text{Aire falso}} = \frac{O_2 \text{ salida del pre-calentador} - O_2 \text{ entrada del horno}}{21 - O_2 \text{ salida del pre-calentador}}$$

$$X_{\text{Aire falso}} = \frac{5,6-1,1}{21-5,6} \times 100 = 29,221\% \text{ del gas de salida del pre-calentador}$$

$$Q_{\text{Aire falso}} = 283631,34 \times \frac{29,221}{100}$$

$$Q_{\text{Aire falso}} = 82879,914 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_0 \text{ Aire falso} = 82879,914 \frac{m^3}{h} \left(\frac{556,65 - 31,5187}{760} \right) \left(\frac{273}{273 + 361} \right)$$

$$Q_0 \text{ Aire falso} = 24659,087 \frac{m^3}{h}$$

$$m_{\text{Aire falso}} = 24659,087 \frac{m^3}{h} \times 1,2929 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{\text{Aire falso}} = 31881,734 \frac{kg}{h}$$

Cálculo de los flujos de salida de masa del sistema

a) Clinker

Tabla 85

Datos para el cálculo del clinker

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo al sistema	64000	kg/h
$F_{\text{c-kk}}$	Factor crudo Clinker	1,854	---

-Cálculo del clinker

$$m_{\text{clinker}} = \frac{m_{\text{alim}}}{F_{\text{c-kk}}}$$



$$m_{\text{clinker}} = \frac{64000}{1,854}$$

$$m_{\text{clinker}} = 34519,957$$

b) Aire residual

Tabla 86

Datos para el cálculo del aire residual

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$P_{\text{din aire res}}$	Presión dinámica del aire residual	1,65	mmH ₂ O
P_{sar}	Presión estática del aire residual	1,387	mmH ₂ O
T_{arch}	Temperatura del aire residual en la chimenea	105,9	°C

-Cálculo del caudal másico del aire residual

$$m_{\text{aire res}} = v_{\text{aire res}} \times \rho \times A_{\text{chim}}$$

-Cálculo de la velocidad del aire residual

$$v_{\text{aire res}} = 4,43k \sqrt{\frac{P_{\text{din aire res}}}{\rho}}$$

-Cálculo de la densidad

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T_0}{T_{\text{arch}}} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

$$\rho = 1,2929 \left(\frac{273}{273+105,9} \right) \left(\frac{556,65+1,387 \times 760}{10332,274528} \right)$$

$$\rho = 0.682 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

-Cálculo de la velocidad del aire residual

$$v_{\text{aire res}} = 4,43 \times 1 \sqrt{\frac{1.65}{0.682}}$$

$$v_{\text{aire res}} = 6,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{aire res}} = 6,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}$$

$$v_{\text{aire res}} = 24805,958 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

-Cálculo del caudal másico del aire residual

$$m_{\text{aire res}} = v_{\text{aire res}} \times \rho \times A_{\text{chim}}$$



$$m_{\text{aire res}} = 24805,958 \frac{m}{h} \times 0,682 \frac{kg}{m^3} \times 2,865m^2$$

$$m_{\text{aire res}} = 48472,676 \frac{kg}{h}$$

c) *Polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas:*

Tabla 87

Datos para el cálculo del polvo de clinker

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo al sistema	64000	kg/h
x_{c-pkk}	Factor crudo-polvo de Clinker	57,764	

-Cálculo de polvo de Clinker recuperado del filtro de mangas

$$m_{\text{polvo de 176linker}} = \frac{m_{\text{alim}}}{x_{c-pkk}}$$

$$m_{\text{polvo de 176linker}} = \frac{64000}{57,764}$$

$$m_{\text{polvo de 176linker}} = 1107,956 \frac{kg}{h}$$

d) *Gases de salida del pre-calentador*

Tabla 88

Datos para el cálculo de los gases del pre-calentador

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
T_{gs}	Temperatura de los gases de salida	361	°C
$P_{\text{din gas}}$	Presión dinámica de los gases de salida	16	mm H2O
$P_{\text{est gas}}$	Presión estática de los gases de salida	-428,5	mm H2O
O_2	Porcentaje de O2 en los gases de salida	5,6	%
CO_2	Porcentaje de CO2 en los gases de salida	12,195	%
N_2	Porcentaje de N2 en los gases de salida	82,205	%

-Cálculo del caudal másico de gases de salida del pre-calentador

$$m_{\text{gas}} = v_{\text{gas}} \rho_{\text{gas}} A_{\text{down}}$$

-Cálculo la densidad de los gases de salida del pre-calentador



$$\rho_{0\text{ gas}} = x_{CO_2}\rho_{CO_2} + x_{O_2}\rho_{O_2} + x_{N_2}\rho_{N_2}$$

$$\rho_{0\text{ gas}} = 0,12195 \times 1,963 + 0,056 \times 1,428 + 0,82205 \times 1,249$$

$$\rho_{0\text{ gas}} = 1,346 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Haciendo un paréntesis para comparar los resultados obtenidos con todos los datos y usando solo los componentes mayoritarios, a continuación se calcula la densidad con todos los gases

$$\rho_{0\text{ gas}} = x_{CO_2}\rho_{CO_2} + x_{O_2}\rho_{O_2} + x_{N_2}\rho_{N_2} + x_{NO}\rho_{NO} + x_{SO_2}\rho_{SO_2} + x_{CO}\rho_{CO}$$

$$\rho_{0\text{ gas}} = 0,12195 \times 1,963 + 0,056 \times 1,428 + 0,81762 \times 1,249 + \frac{194,33}{1000000} \times 1,339 + \frac{2,667}{1000000} \times 2,856 + \frac{4233}{1000000} \times 1,249$$

$$\rho_{0\text{ gas}} = 1,3461 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Como se ve comparando estos 2 valores la diferencia está en el cuarto decimal, por lo que no hay inconveniente al realizar este cambio. Y ahora:

$$\rho_{gas} = 1,346 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(\frac{556,65 - 428,5 \times 760 / 10332,274528}{760} \right) \left(\frac{273}{273 + 361} \right)$$

$$\rho_{gas} = 0,4005 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

-Cálculo de la velocidad de los gases de salida del pre-calentador

$$v_{gas} = 4,43 \times 0,85 \sqrt{\frac{27,83}{0,4005}}$$

$$v_{gas} = 31,389 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{gas} = 31,389 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}$$

$$v_{down} = 113000,534 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

-Cálculo del caudal másico de gases de salida del pre-calentador

$$m_{gas} = v_{gas} \times \rho_{gas} \times A_{down}$$

$$m_{gas} = 113000,534 \frac{\text{m}}{\text{h}} \times 0,4005 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,51 \text{ m}^2$$

$$m_{gas} = 113594,352 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{gas} = \frac{m_{gas}}{\rho_{gas}}$$



$$Q_{\text{gas}} = \frac{113594,352}{0,4005} = 283631,34 \frac{m^3}{h}$$

e) *Polvo de crudo recuperado en el filtro de mangas y en la torre de enfriamiento:*

Tabla 89

Datos para el cálculo del polvo de crudo

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{alim}	Caudal másico de alimentación de crudo al sistema	64000	kg/h
x_{crudo}	Factor crudo-polvo de Clinker	10,93	%

-Cálculo de polvo de Clinker recuperado del filtro de mangas

$$m_{\text{crudo}} = m_{\text{alim}} \times \frac{x_{\text{crudo}}}{100}$$

$$m_{\text{crudo}} = 64000 \times \frac{10,93}{100}$$

$$m_{\text{polvo de crudo}} = 6995,2 \frac{kg}{h}$$



Anexo XXII

Cálculo de los flujos de energía

Corrientes de entrada de energía

a) *Calor sensible de la alimentación del crudo:*

Tabla 90

Datos para el cálculo del calor sensible de la alimentación de crudo

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{crudo\ seco}$	Caudal másico de crudo seco alimentado al sistema	64000	kg/h
T_{crudo}	Temperatura del crudo alimentado al sistema	47	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor sensible del crudo

$$q_{crudo\ seco} = m_{crudo\ seco} \times cp_{crudo} \times \Delta T$$

-Cálculo del calor específico del crudo

$$cp_{crudo} = 0,21 + 0,00007 \times \left(\frac{T_{crudo} + T_{amb}}{2} \right)$$

$$cp_{crudo} = 0,21 + 0,00007 \times \left(\frac{47 + 20}{2} \right)$$

$$cp_{crudo} = 0,2123$$

-Cálculo del calor sensible del crudo

$$q_{crudo} = 64000 \times 0,2123 \times (47 - 20)$$

$$q_{crudo} = 366854,4 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

b) *Calor sensible del combustible*

Tabla 91

Datos para el cálculo del calor sensible del combustible

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{comb}	Caudal másico de combustible	3461	kg/h
T_{comb}	Temperatura del combustible	131	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C



-Cálculo del calor sensible del combustible

$$q_{comb} = m_{comb} \times cp_{comb} \times \Delta T$$

-Cálculo del calor específico del combustible

$$cp_{comb} = 0,41 + 0,00043 \times \left(\frac{T_{comb} + T_{amb}}{2} \right)$$

$$cp_{comb} = 0,41 + 0,00043 \times \left(\frac{131 + 20}{2} \right)$$

$$cp_{crudo} = 0,4425$$

-Cálculo del calor sensible del combustible

$$q_{comb} = 3461 \times 0,4425 \times (131 - 20)$$

$$q_{crudo seco} = 169995,668 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

c) *Calor sensible del aire primario*

Tabla 92

Datos para el cálculo del calor sensible del aire primario

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{aire\ primario}$	Caudal másico del aire primario	12378,623	kg/h
T_{ae1}	Temperatura del aire de enfriamiento y primario	25,983	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor sensible del aire primario

$$q_{aire\ primario} = m_{aire\ primario} \times cp_{aire} \times \Delta T$$

$$q_{aire\ primario} = 12378,623 \times cp_{aire} \times (25,983 - 20)$$

-Cálculo del calor específico del aire primario y del aire de enfriamiento

$$cp_{aire\ enf\ 1} = 0,247 + 4,4 \times 0,00001 \times \left(\frac{25,983 + 20}{2} \right)$$

$$cp_{aire\ enf\ 1} = 0,248$$

-Cálculo del calor sensible del aire primario

$$q_{aire\ primario} = 12378,623 \times 0,248 \times (25,983 - 20)$$



$$q_{\text{aire primario}} = 18368,064 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

d) *Calor sensible del aire de enfriamiento*

Tabla 93

Datos para el cálculo del calor sensible del aire de enfriamiento

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{\text{aire de enfriamiento}}$	Caudal másico del aire de enfriamiento	93343,836	Kg/h
T_{ae1}	Temperatura del aire de enfriamiento y primario	25,983	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor sensible del aire de enfriamiento

$$q_{\text{aire enf}} = 93343,836 \times 0,248 \times (25,983 - 20)$$

$$q_{\text{aire enf}} = 138502,09 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

e) *Calor de combustión*

Tabla 94

Datos para el cálculo del calor de combustión

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{comb}	Caudal másico del combustible	3461	Kg/h
PCI	Poder calorífico inferior	9426,391	Kcal/kg

-Cálculo del calor de combustión

$$q_{\text{combust}} = m_{\text{comb}} \times \text{PCI}$$

$$q_{\text{combust}} = 3461 \times 9426,391$$

$$q_{\text{combust}} = 32624739,68 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$



Corrientes de salida de energía

a) Calor sensible del Clinker

Tabla 95

Datos para el cálculo del calor sensible del clinker

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{clinker}$	Caudal másico del Clinker	34519,957	Kg/h
$T_{clinker}$	Temperatura del Clinker	131	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor sensible del Clinker

$$q_{clinker} = m_{clinker} \times cp_{kk} \times \Delta T$$

$$q_{clinker} = 34519,957 \times cp_{kk} \times (170,3 - 20)$$

-Cálculo del calor específico del Clinker

$$cp_{kk} = 0,18 + 0,000071 \times \left(\frac{T_{clinker} + T_{amb}}{2} \right)$$

$$cp_{kk} = 0,18 + 0,000071 \times \left(\frac{131 + 20}{2} \right)$$

$$cp_{kk} = 0,1854$$

-Cálculo del calor sensible del Clinker

$$q_{clinker} = 34519,957 \times 0,1854 \times (170,3 - 20)$$

$$q_{clinker} = 961920,004 \frac{kcal}{h}$$

b) Calor de evaporación del agua del crudo:

Tabla 96

Datos para el cálculo del calor de evaporación del agua

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{humedad}$	Caudal másico de agua en el crudo	448	kg/h

-Cálculo del calor de evaporación del agua en el crudo



$$q_{evap} = 448 \times h_{fg}$$

-Cálculo del calor de evaporación del agua

Viendo en la tabla de entalpías del agua (Anexo XXIV) se sabe que este valor es:

$$h_{fg} = 570,636$$

-Cálculo del calor de evaporación del agua en el crudo

$$q_{evap} = 448 \times 570,636$$

$$q_{evap} = 255644,928 \frac{kcal}{h}$$

c) *Calor sensible del aire residual*

Tabla 97

Datos para el cálculo sensible del calor del aire residual

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{aire\ residual}$	Caudal másico del aire residual	48472,676	kg/h
T_{ar}	Temperatura del aire residual	278,3	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20,5	°C

-Cálculo del calor sensible del aire residual

$$q_{aire\ residual} = m_{aire\ residual} \times cp_{aire\ res} \times \Delta T$$

$$q_{aire\ residual} = 48472,676 \times cp_{aire\ res} \times (278,3 - 20)$$

-Cálculo del calor específico del aire residual

$$cp_{aire\ res} = 0,247 + 4,4 \times 0,00001 \times \left(\frac{278,3+20}{2}\right)$$

$$cp_{aire\ res} = 0,2536$$

-Cálculo del calor sensible del aire residual

$$q_{aire\ residual} = 48472,676 \times 0,2536 \times (278,3 - 20)$$

$$q_{aire\ residual} = 3175196,825 \frac{kcal}{h}$$

d) *Calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas*



Tabla 98

Datos para el cálculo del calor sensible del polvo de Clinker recuperado

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{clinker recuperado}$	Caudal másico del Clinker recuperado	1107,956	kg/h
$T_{polvo\ kk}$	Temperatura del Clinker recuperado	278,3	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

- *Cálculo del Calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas*

$$q_{polvo\ kk} = m_{clinker\ recuperado} \times cp_{clinker} \times \Delta T$$

$$q_{polvo\ kk} = 1107,956 \times cp_{clinker} \times (278,3 - 20)$$

-Cálculo del calor específico del polvo de Clinker

$$cp_{clinker} = 0,18 + 0,000071 \times \left(\frac{278,3+20}{2}\right)$$

$$cp_{clinker} = 0,191$$

- *Cálculo del Calor sensible del polvo de Clinker recuperado en el filtro de mangas*

$$q_{polvo\ kk} = 1107,956 \times 0,191 \times (278,3 - 20)$$

$$q_{polvo\ kk} = 54661,342 \frac{kcal}{h}$$

e) *Calor sensible de gases de salida del pre-calentador*

Tabla 99

Datos para el cálculo del calor sensible de los gases de salida del pre-calentador

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$m_{gases\ de\ sal}$	Caudal másico de los gases de salida	113594,352	kg/h
T_{gas}	Temperatura de los gases de salida	361	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor sensible de gases de salida del pre-calentador

$$q_{gases\ de\ salida} = 113594,252 \times cp_{gas} \times (361 - 20)$$

-Cálculo del calor específico de los gases de salida del pre-calentador



$$cp_{gas}=0,23 + 0,00005 \times \left(\frac{T_{gas}+T_{amb}}{2}\right)$$

$$cp_{gas}=0,23 + 0,00005 \times \left(\frac{361+20}{2}\right)$$

$$cp_{gas}=0,2385$$

-Cálculo del calor sensible de gases de salida del pre-calentador

$$q_{gases\ de\ salida} = 113594,252 \times 0,2385 \times (361 - 20)$$

$$q_{gases\ de\ salida} = 9238450,124 \frac{kcal}{h}$$

f) *Calor sensible del polvo de crudo recuperado del colector de polvos*

Tabla 100

Datos para el cálculo del calor sensible del polvo de crudo recuperado

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
m_{polvo}	Caudal másico de polvos de crudo recuperado	6955,2	Kg/h
T_{polvo}	Temperatura de polvos de crudo recuperado	361	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor sensible del polvo de crudo recuperado del colector de polvos

$$q_{polvo} = m_{polvo} \times cp_{polvo} \times \Delta T$$

$$q_{polvo} = 6955,2 \times cp_{polvo} \times (361 - 20)$$

-Cálculo del calor específico de crudo recuperado del colector de polvos

$$cp_{polvo}=0,23 + 1,2E - 4 \times \left(\frac{t_{pp}+t_{amb}}{2}\right) - \frac{3,076}{273+\left(\frac{T_{polvo}+T_{amb}}{2}\right)}$$

$$cp_{polvo}=0,23 + 1,2E - 4 \times \left(\frac{361+20}{2}\right) - \frac{3,076}{273+\left(\frac{361+20}{2}\right)}$$

$$cp_{polvo}=0,246$$

-Cálculo del calor sensible del polvo de crudo recuperado del colector de polvos

$$q_{polvo} = 6955,2 \times 0,246 \times (361 - 20)$$

$$q_{polvo} = 583443,907 \frac{kcal}{h}$$



g) Pérdidas por radiación

Tabla 101

Datos para el cálculo del calor perdido por radiación

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
t_{E1A}	Temperatura en la etapa 1 A	123,840	°C
t_{E1B}	Temperatura en la etapa 1 B	131,915	°C
t_{E2}	Temperatura en la etapa 2	89,673	°C
t_{E3}	Temperatura en la etapa 3	122,298	°C
t_{E4}	Temperatura en la etapa 4	162,200	°C
t_h	Temperatura promedio en el horno	200,609	°C
t_{enf}	Temperatura promedio del enfriador	84,894	°C
t_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C

-Cálculo del calor de radiación del pre-calentador

-Cálculo del calor de radiación de la etapa 1 A

$$q_{rad1A} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 123,84)^4 - (273 + 20)^4)0,85 \times 81,948$$

$$q_{rad1A} = 59236,538 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de radiación de la etapa 1 B

$$q_{rad1B} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 131,915)^4 - (273 + 20)^4)0,85 \times 81,948$$

$$q_{rad1B} = 66308,84 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de radiación de la etapa 2

$$q_{rad2} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 89,673)^4 - (273 + 20)^4)0,85 \times 105,754$$

$$q_{rad2} = 43552,235 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de radiación de la etapa 3

$$q_{rad3} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 122,298)^4 - (273 + 20)^4)0,85 \times 128,567$$

$$q_{rad3} = 90892,0398 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de radiación de la etapa 4



$$q_{rad4} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 162,200)^4 - (273 + 20)^4) 0,85 \times 122,536$$

$$q_{rad4} = 144836,8423 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de radiación de los ductos

$$q_{radduc} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 144,109)^4 - (273 + 20)^4) 0,85 \times 585,612$$

$$q_{radduc} = 556117,533 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo de calor de radiación del pre-calentador

$$q_{radpre} = 59236,538 + 66308,84 + 43552,235 + 90892,0398 + 144836,8423 + 556117,533$$

$$q_{radpre} = 960944,028 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo de calor de radiación del horno

$$q_{radh} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 200,609)^4 - (273 + 20)^4) \times 0,85 \times 749,65$$

$$q_{radh} = 1335029,17 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo de calor de radiación del enfriador

$$q_{radenf} = 4,8789E - 8 \times ((273 + 84,894)^4 - (273 + 20)^4) \times 0,85 \times 238,798$$

$$q_{radenf} = 89489,581 \frac{kcal}{h}$$

h) Pérdidas por convección

Tabla 102

Datos para el cálculo del calor perdido por convección

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
t_{E1A}	Temperatura en la etapa 1 A	123,840	°C
t_{E1B}	Temperatura en la etapa 1 B	131,915	°C
t_{E2}	Temperatura en la etapa 2	89,673	°C
t_{E3}	Temperatura en la etapa 3	122,298	°C
t_{E4}	Temperatura en la etapa 4	162,200	°C
t_h	Temperatura promedio en el horno	220,5	°C
t_{enf}	Temperatura promedio del enfriador	84,894	°C
t_{amb}	Temperatura ambiente	20	°C



-Cálculo del calor de convección del pre-calentador

-Cálculo del calor de convección de la etapa 1A

$$q_{c1A} = 80,33 \left[\frac{(273+123,84)+(273+20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 123,84) - (273 + 20))^{1,333} \times 81,948$$

$$q_{c1A} = 46657,572 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de convección de la etapa 1B

$$q_{c1B} = 80,33 \left[\frac{(273+131,915)+(273+20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 131,915) - (273 + 20))^{1,333} \times 81,948$$

$$q_{c1B} = 51123,068 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de convección de la etapa 2

$$q_{c2} = 80,33 \left[\frac{(273+89,673)+(273+20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 89,673) - (273 + 20))^{1,333} \times 105,754$$

$$q_{c2} = 36698,108 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de convección de la etapa 3

$$q_{c3} = 80,33 \left[\frac{(273+122,298)+(273+20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 122,298) - (273 + 20))^{1,333} \times 128,567$$

$$q_{c3} = 71871,334 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de convección de la etapa 4

$$q_{c4} = 80,33 \left[\frac{(273+162,200)+(273+20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 162,200) - (273 + 20))^{1,333} \times 122,536$$

$$q_{c4} = 102007,677 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo del calor de convección de los ductos

$$q_{cduc} = 80,33 \left[\frac{(273+144,109)+(273+20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 144,109) - (273 + 20))^{1,333} \times 585,612$$



$$q_{cduc} = 414108,273 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo de calor de convección del pre-calentador

$$q_{cpre} = 51123,068 + 46657,572 + 36698,108 + 71871,334 + 102007,677 + 414108,273$$

$$q_{cpre} = 722466,032 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo de calor de convección del horno

$$q_{ch} = 80,33 \left[\frac{(273 + 200,609) + (273 + 20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 200,609) - (273 + 20))^{1,333} \times 749,65$$

$$q_{ch} = 826959,27 \frac{kcal}{h}$$

-Cálculo de calor de convección del enfriador

$$q_{cenf} = 80,33 \left[\frac{(273 + 84,894) + (273 + 20)}{2} \right]^{-0,724} ((273 + 84,894) - (273 + 20))^{1,333} \times 238,798$$

$$q_{cenf} = 75777,695 \frac{kcal}{h}$$

f) Calor de reacción

Tabla 103

Datos para el cálculo del calor de reacción

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
Al ₂ O ₃	Porcentaje de Óxido de aluminio en el clinker	4.028	%
MgO	Porcentaje de Óxido de magnesio en el clinker	1.068	%
CaO	Porcentaje de Óxido de calcio en el Clinker	67.165	%
SiO ₂	Porcentaje de Óxido de silicio en el Clinker	22.783	%
Fe ₂ O ₃	Porcentaje de Óxido férrico en el Clinker	3.02	%

$$q_{reac} = 4,11 \times Al_2O_3 + 6,48 \times MgO + 7,646 \times CaO - 5,116 \times SiO_2 - 0,59 \times Fe_2O_3$$

$$q_{reac} = 4,11 \times 4,028 + 6,48 \times 1,068 + 7,646 \times 67,165 - 5,116 \times 22,783 - 0,59 \times 3,02$$

$$q_{reac} = 418,218 \frac{kcal}{kg \text{ de } kk} \times 35627,913 \frac{kg}{h}$$



$$q_{reac} = 14900245,42 \frac{kcal}{h}$$

Anexo XXIV

Tablas del vapor saturado

Temperatura	hfg
0	597.27
10	591.55
20	585.83
30	580.2
40	574.5
50	568.9
60	563.16
70	557.33
80	551.44
90	545.27
100	539.05



dhorno: Diámetro del horno	maenfriamiento: Caudal másico de aire de enfriamiento
dn2: densidad del nitrógeno en condiciones normales	maf: Caudal másico de aire falso
do2: densidad del oxígeno en condiciones normales	mar: Caudal másico de aire residual
dtub: Diámetro de los ductos del precalentador	mclinker: Caudal másico de Clinker
E: emisividad	mcomb: Caudal másico del combustible
efenf: Eficiencia del enfriador	mcrudohum: Caudal másico de humedad en el crudo
entradase: Sumatoria total de entradas de energía al sistema	mcrudoseco: Caudal másico de crudo seco
entradasm: Sumatoria total de entradas de masa	mgo: % MgO del clinker
fe2o3: % Fe ₂ O ₃ del clinker	mgs: Caudal másico de gases de salida
Fecha: Fecha actual	mkkrec: Caudal másico de Clinker recuperado
G: factor para el cálculo del poder calorífico inferior	motros: Caudal másico de pérdidas indeterminadas
H= Porcentaje de hidrógeno en el combustible	mpolvoperd: Caudal másico de polvo arrastrado de crudo
H2O= Porcentaje de agua en el combustible	mpp: Relación de caudal másico de polvos de crudo recuperados, respecto al crudo alimentado
hum: humedad del crudo alimentado al sistema	N= Porcentaje de nitrógeno en el combustible
kkrec: Relación del Clinker recuperado	O= Porcentaje de oxígeno en el combustible
lh: longitud del horno	o2: Composición de O ₂ de gases de salida
ma1: Caudal másico de aire primario	o2h: % O ₂ en la entrada del horno
ma2: Caudal másico de aire secundario	



otrose: Pérdidas indeterminadas de energía

pa1: Presión manométrica del aire primario

patm: presión atmosférica

pcinf: poder calorífico inferior del combustible

pcsup: Poder calorífico superior del combustible

pdar: Presión dinámica del aire residual

pdgs: Presión dinámica de gases de salida

pf17a: Presión estática de la cámara de A del ventilador F17

pf17b: Presión estática de la cámara de B del ventilador F17

pf18a: Presión estática de la cámara de A del ventilador F18

pf18b: Presión estática de la cámara de B del ventilador F18

pf19: Presión estática del ventilador F19

pf20: Presión estática del ventilador F20

pf21: Presión estática del ventilador F21

psar: Presión estática del aire residual

psgs: "Presión estática de gases de salida

qa1: Calor sensible del aire primario

qae: Calor sensible del aire de enfriamiento

qcomb: Calor de combustión

qea: Calor de evaporación del agua

qenf: Calor perdido en las paredes del enfriador

qente: Calor que entra al enfriador

Qf17: Caudal volumétrico del aire que ingresa como aire de enfriamiento por el ventilador F17

Qf18: Caudal volumétrico del aire que ingresa como aire de enfriamiento por el ventilador F18

Qf19: Caudal volumétrico del aire que ingresa como aire de enfriamiento por el ventilador F19

Qf20: Caudal volumétrico del aire que ingresa como aire de enfriamiento por el ventilador F20

Qf21: Caudal volumétrico del aire que ingresa como aire de enfriamiento por el ventilador F21

qh: Calor perdido en las paredes del horno

qpa: Calor del polvo de crudo arrastrado

qpre: Calor perdido en las paredes del pre-calentador

qreac: Calor de reacción

qsar: Calor sensible del aire residual



qscomb: Calor sensible de combustible	te1b: Temperatura de la pared en la etapa 1B
qsgs: Calor sensible de los gases de salida	te2: Temperatura de la pared en la etapa 2
qskk: Calor sensible del Clinker	te3: Temperatura de la pared en la etapa 3
qspkk: Calor sensible del polvo de Clinker	te4: Temperatura de la pared en la etapa 4
rck: Factor crudo clinker	tgs: Temperatura de gases de salida
Responsable: Nombre de la persona responsable de realizar el documento y de toma de datos	tk: temperatura del Clinker
S= Porcentaje de azufre en el combustible	tkksh: temperatura del Clinker a la salida del horno
salidase: Sumatoria total de energía de salida del sistema	tpe: Temperatura de las paredes en el enfriador
salidasm: Sumatoria total de salidas de masa	tpb: Temperatura en las paredes del horno
sio2: % SiO ₂ del Clinker	tpkk: Temperatura del polvo de clinker
ta2: Temperatura del aire secundario	ttp: Temperatura de los ductos del pre-calentador
taea1: Temperatura del aire de enfriamiento y del aire primario	vacio: variable vacía
tamb: Temperatura ambiente	vaciosn: Indicador si el nombre del responsable está vacío o no
tar: Temperatura del aire residual a la salida del sistema	var: velocidad del aire residual
tch: Temperatura del aire residual a la salida de la chimenea	velgs: velocidad de gases de salida
tcomb: Temperatura del combustible	vv: Velocidad del viento
tcr: Temperatura del crudo	x1: Respuesta 1 del aire primario
te1a: Temperatura de la pared en la etapa 1A	x2: Respuesta 2 del aire primario



Anexo XXVI

Codificación

XXVI.I. Codificación antes del cargado de la ventana “Presentacion”

```
Function Presentacion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
movegui(hObject, 'center')
imagen=imread('guapan.jpg');
image(imagen);
axis off;
```

XXVI.II. Codificación del botón “Manual” de la ventana de “Presentacion”

```
% --- Executes on button press in Manual.
Function man_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('Manual.docx');
```

XXVI.III. Codificación del botón “Composicion_potencial” de la ventana de “Presentacion”

```
% --- Executes on button press in Composicion_potencial.
Function comppot_Callback(hObject, eventdata, handles)
clinker;
close(Presentacion)
```

XXVI.IV. Codificación del botón “modulo” de la ventana de “Presentacion”

```
% --- Executes on button press in modulo.
Function modulo_Callback(hObject, eventdata, handles)
crudo;
close(Presentacion)
```

XXVI.V. Codificación del botón “balance” de la ventana de “Presentacion”

```
% --- Executes on button press in balance.
Function bal_Callback(hObject, eventdata, handles)
balmc;
close(Presentacion)
```

XXVI.VI. Codificación del botón “salir” de cualquier ventana

```
% --- Executes on button press in salir.
Function salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close
```

XXVI.VII. Codificación del botón “Cargar” de la ventana “crudo”

```
% --- Executes on button press in pushbutton3.
Function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
carga=(get(handles.carga, 'String'));
vacio=isempty(carga);
if vacio==1
```



```
b='Ingrese nombre de hoja';
set(handles.carga,'String',b);
set(handles.carga,'BackgroundColor','red')
else
a=xlsread('Datos.xlsm',carga,'B7:B10')
set(handles.sio2,'string',a(1,1))
set(handles.al2o3,'string',a(2,1))
set(handles.fe2o3,'string',a(3,1))
set(handles.cao,'string',a(4,1))
end
```

Además para que la codificación funcione según lo descrito en el edit text “carga” se escribe la codificación siguiente:

```
% --- Executes on key press with focus on carga and none of its controls.
Function carga_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
set(handles.carga,'backgroundcolor','white')
set(hObject,'string','');
```

XXVI.VIII. Codificación del botón “Calcular” de la ventana “crudo”

```
% --- Executes on button press in pushbutton1.
Function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
sio2c=str2num(get(handles.sio2,'string'));
caoc=str2num(get(handles.cao,'string'));
al2o3c=str2num(get(handles.al2o3,'string'));
fe2o3c=str2num(get(handles.fe2o3,'string'));
MH=caoc/(sio2c+al2o3c+fe2o3c);
MdS=sio2c/(al2o3c+fe2o3c);
MS=sio2c/al2o3c;
MF=al2o3c/fe2o3c;
set(handles.sio2,'string',MH)
set(handles.al2o3,'string',MdS)
set(handles.fe2o3,'string',MS)
set(handles.cao,'string',MF)
set(handles.text1,'string','MH')
set(handles.text2,'string','MdS')
set(handles.text3,'string','MS')
set(handles.text5,'string','MF')
set(handles.titulo,'title','Módulos')
set(handles.text6,'string','')
set(handles.text7,'string','')
set(handles.text8,'string','')
set(handles.text10,'string','')
set(handles.carga,'visible','off')
set(handles.pushbutton3,'visible','off')
set(handles.text11,'visible','off')
```

XXVI.IX. Codificación del botón “Reset” de la ventana “crudo”

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.
Function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
```



```
set(handles.sio2,'string','')
set(handles.cao,'string','')
set(handles.al2o3,'string','')
set(handles.fe2o3,'string','')
set(handles.text1,'string','SiO2')
set(handles.text2,'string','Al2O3')
set(handles.text3,'string','Fe2O3')
set(handles.text5,'string','CaO')
set(handles.titulo,'title','Composición del crudo')
set(handles.text6,'string','%')
set(handles.text7,'string','%')
set(handles.text8,'string','%')
set(handles.text10,'string','%')
set(handles.carga,'visible','on')
set(handles.carga,'string','')
set(handles.pushbutton3,'visible','on')
set(handles.text11,'visible','on')
```

XXVI.X. Codificación del botón “<” de la ventana “crudo”

```
% --- Executes on button press in pushbutton5.
Function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
Presentacion;
close(crudo)
```

XXVI.XI. Codificación del botón “cargar” de la ventana “clinker”

```
% --- Executes on button press in pushbutton3.
Function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
carga=(get(handles.carga,'String'));
vacio=isempty(carga);
if vacio==1
    b='Ingrese nombre de hoja';
    set(handles.carga,'String',b);
    set(handles.carga,'BackgroundColor','red')
else
a=xlsread('Datos.xlsm',carga,'E5:E8')
set(handles.sio2,'string',a(1,1))
set(handles.al2o3,'string',a(2,1))
set(handles.fe2o3,'string',a(3,1))
set(handles.cao,'string',a(4,1))
end
```

Además para poder realizar todo lo descrito se ayuda de otra codificación que se encuentra en el edit text carga:

```
% --- Executes on key press with focus on carga and none of its controls.
Function carga_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
set(handles.carga,'backgroundcolor','white')
set(hObject,'string','');
```



XXVI.XII. Codificación del botón “calcular” de la ventana “clinker”

```
% --- Executes on button press in pushbutton1.  
  
Function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
sio2=str2num(get(handles.sio2,'string'));  
cao=str2num(get(handles.cao,'string'));  
al2o3=str2num(get(handles.al2o3,'string'));  
fe2o3=str2num(get(handles.fe2o3,'string'));  
C4AF=3.04*fe2o3;  
C3A=2.65*al2o3-1.69*fe2o3;  
C2S=8.6*sio2+1.08*fe2o3+5.07*al2o3-3.07*cao;  
C3S=4.07*cao-7.6*sio2-1.43*fe2o3-6.72*al2o3;  
set(handles.sio2,'string',C4AF)  
set(handles.al2o3,'string',C3A)  
set(handles.fe2o3,'string',C2S)  
set(handles.cao,'string',C3S)  
set(handles.text1,'string','C4AF')  
set(handles.text2,'string','C3A')  
set(handles.text3,'string','C2S')  
set(handles.text4,'string','C3S')  
set(handles.uipanel1,'title','Composición potencial')  
set(handles.carga,'visible','off')  
set(handles.pushbutton3,'visible','off')  
set(handles.text9,'visible','off')
```

XXVI.XIII. Codificación del botón “Reset” de la ventana “clinker”

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.  
Function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
set(handles.sio2,'string','')  
set(handles.al2o3,'string','')  
set(handles.fe2o3,'string','')  
set(handles.cao,'string','')  
set(handles.text1,'string','SiO2')  
set(handles.text2,'string','Al2O3')  
set(handles.text3,'string','Fe2O3')  
set(handles.text4,'string','CaO')  
set(handles.uipanel1,'title','Composición del clinker')  
set(handles.carga,'visible','on')  
set(handles.carga,'string','')  
set(handles.pushbutton3,'visible','on')  
set(handles.text9,'visible','on')
```

XXVI.XIV. Codificación del botón “<<” de la ventana “clinker”

```
% --- Executes on button press in pushbutton5.  
  
Function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
Presentacion;  
close(clinker)
```



XXVI.XV. Codificación antes del cargado de la ventana “balmc”

```
% --- Executes just before balmc is made visible.
Function balmc_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

movegui(hObject, 'center')
imagen=imread('fondo.png');
image(imagen);
axis off;
global menm
global mene
menm='kg/h';
mene='kcal/kgkk';
%Global de datos
global Ae1a
global Ae1b
global Ae2
global Ae3
global Ae4
global Atub
global Aenfr
global dela
global delb
global de2
global de3
global de4
global dtub
global dh
global denf
global dgs
global df27
global lh
global C
global H
global S
global N
global O
global Cen
global H2O
global pcsup
global densairen
global densal
global patm
global E
data=xlsread('Datos.xlsm','Datos','B3:K16');
Ae1a=data(12,1);
Ae1b=data(12,2);
Ae2=data(12,3);
Ae3=data(12,4);
Ae4=data(12,5);
Atub=data(12,6);
Aenfr=data(12,8);
dela=data(13,1);
delb=data(13,2);
de2=data(13,3);
de3=data(13,4);
```



```
de4=data(13,5);
dtub=data(13,6);
dh=data(13,7);
denf=data(13,8);
dgs=data(13,9);
df27=data(13,10)
lh=data(14,7);
C=data(2,2);
H=data(3,2);
S=data(4,2);
N=data(5,2);
O=data(6,2);
Cen=data(7,2);
H2O=data(8,2);
pcsup=data(1,5);
densairen=data(3,7);
densal=data(5,6);
patm=data(7,6);
E=data(1,10);
```

XXVI.XVI. Codificación del botón “<<” de la ventana “balmc”

```
% --- Executes on button press in pushbutton7.
Function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
Presentacion;
close(balmc)
```

XXVI.XVII. Codificación del botón “cargar” de la ventana “balmc”

```
% --- Executes on button press in pushbutton6.
Function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

carga=(get(handles.carga, 'String'));
vacio=isempty(carga);
if vacio==1
    b='Ingrese nombre de hoja';
    set(handles.carga, 'String',b);
    set(handles.carga, 'BackgroundColor', 'red')
else
a=xlsread('Datos.xlsm',carga, 'A5:J26')

set(handles.co2, 'String', a(13,1));
set(handles.o2, 'String', a(14,1));
set(handles.pdgs, 'String', a(15,1));
gset(handles.psgs, 'String', a(16,1));
set(handles.tgs, 'String', a(17,1));
set(handles.hum, 'String', a(1,1));
set(handles.tcr, 'String', a(8,1));
set(handles.alim, 'String', a(9,1));
set(handles.kkrec, 'String', a(8,4));
```



```
set(handles.mpp, 'String', a(2,1));
set(handles.tela, 'String', a(17,7));
set(handles.telb, 'String', a(18,7));
set(handles.te2, 'String', a(19,7));
set(handles.te3, 'String', a(20,7));
set(handles.te4, 'String', a(21,7));
set(handles.ttp, 'String', a(22,7));
set(handles.tph, 'String', a(13,4));
set(handles.o2h, 'String', a(19,1));
set(handles.te4, 'String', a(21,7));
set(handles.tpe, 'String', a(15,4));
set(handles.taeal, 'String', a(13,7));
set(handles.tamb, 'String', a(17,4));
set(handles.vv, 'String', a(18,4));
set(handles.pdar, 'String', a(8,7));
set(handles.psar, 'String', a(9,7));
set(handles.tch, 'String', a(10,7));
set(handles.tar, 'String', a(11,7));
set(handles.pal, 'String', a(15,7));
set(handles.tcomb, 'String', a(10,4));
set(handles.comb, 'String', a(11,4));
set(handles.f17, 'String', a(2,7));
set(handles.f18, 'String', a(3,7));
set(handles.f19, 'String', a(4,7));
set(handles.f20, 'String', a(5,7));
set(handles.f21, 'String', a(6,7));
set(handles.pf17a, 'String', a(2,8));
set(handles.pf17b, 'String', a(2,9));
set(handles.pf18a, 'String', a(3,8));
set(handles.pf18b, 'String', a(3,9));
set(handles.pf19, 'String', a(4,8));
set(handles.pf20, 'String', a(5,8));
set(handles.pf21, 'String', a(6,8));
set(handles.sio2, 'String', a(1,4));
set(handles.al2o3, 'String', a(2,4));
set(handles.fe2o3, 'String', a(3,4));
set(handles.cao, 'String', a(4,4));
set(handles.mgo, 'String', a(5,4));
set(handles.tk, 'String', a(6,4));
set(handles.rck, 'String', a(11,1));
set(handles.ta2, 'String', a(20,4));
set(handles.tshkk, 'String', a(21,1));
end
```

En cuanto al edit text carga, también tiene una codificación:

```
% --- Executes on key press with focus on carga and none of its controls.
Function carga_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
set(handles.carga, 'BackgroundColor', 'white')
set(hObject, 'string', '');
```

XXVI.XVIII. Codificación del botón “Borrar” de la ventana “balmc”

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.
Function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
vacio='';
```



```
set(handles.co2, 'String', vacio);
set(handles.o2, 'String', vacio);
set(handles.pdgs, 'String', vacio);
set(handles.psgs, 'String', vacio);
set(handles.tgs, 'String', vacio);
set(handles.hum, 'String', vacio);
set(handles.rck, 'String', vacio);
set(handles.mpp, 'String', vacio);
set(handles.kkrec, 'String', vacio);
set(handles.tcr, 'String', vacio);
set(handles.alim, 'String', vacio);
set(handles.tela, 'String', vacio);
set(handles.telb, 'String', vacio);
set(handles.te2, 'String', vacio);
set(handles.te3, 'String', vacio);
set(handles.te4, 'String', vacio);
set(handles.ttp, 'String', vacio);
set(handles.tph, 'String', vacio);
set(handles.tpe, 'String', vacio);
set(handles.o2h, 'String', vacio);
set(handles.taeal, 'String', vacio);
set(handles.tamb, 'String', vacio);
set(handles.vv, 'String', vacio);
set(handles.pdar, 'String', vacio);
set(handles.psar, 'String', vacio);
set(handles.tch, 'String', vacio);
set(handles.tar, 'String', vacio);
set(handles.pal, 'String', vacio);
set(handles.tcomb, 'String', vacio);
set(handles.comb, 'String', vacio);
set(handles.f17, 'String', vacio);
set(handles.f18, 'String', vacio);
set(handles.f19, 'String', vacio);
set(handles.f20, 'String', vacio);
set(handles.f21, 'String', vacio);
set(handles.pf17a, 'String', vacio);
set(handles.pf17b, 'String', vacio);
set(handles.pf18a, 'String', vacio);
set(handles.pf18b, 'String', vacio);
set(handles.pf19, 'String', vacio);
set(handles.pf20, 'String', vacio);
set(handles.pf21, 'String', vacio);
set(handles.sio2, 'String', vacio);
set(handles.al2o3, 'String', vacio);
set(handles.fe2o3, 'String', vacio);
set(handles.cao, 'String', vacio);
set(handles.mgo, 'String', vacio);
set(handles.tk, 'String', vacio);
set(handles.res, 'String', vacio);
set(handles.res, 'backgroundcolor', 'white');
set(handles.ta2, 'String', vacio);
set(handles.tshkk, 'String', vacio);
```



XXVI.XIX. Codificación del botón “Calcular” de la ventana “balmc”

```
% --- Executes on button press in pushbutton5.
Function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Globalización de variables
global Ae1A
global Ae1B
global Ae2
global Ae3
global Ae4
global Atub
global Aenfr
global dela
global delb
global de2
global de3
global de4
global dtub
global dh
global denf
global df27
global dgs
global lh
global C
global H
global S
global N
global O
global Cen
global H2O
global pcsup
global densairen
global densal
global patm
global E
global Responsable
    %Datos de balance masico

global mcrudoseco
global mcrudohum
global mcomb
global maenfriamiento
global ma1
global mafp
global entradasm
global mclinker
global mpolvoperd
global mar
global mgs
global motros
global mkkrec
```



```
global salidasm
```

```
    %Datos de balance térmico
```

```
global qscomb  
global qcomb  
global qalim  
global qal  
global qae  
global entradase  
global qreac  
global qskk  
global qsgs  
global qsar  
global qpa  
global qea  
global qh  
global qpre  
global qenf  
global qspkk  
global otrose  
global salidase  
global efenf  
global Fecha
```

```
    %Lectura de datos
```

```
co2=str2num(get(handles.co2, 'String'));  
o2=str2num(get(handles.o2, 'String'));  
pdgs=str2num(get(handles.pdgs, 'String'));  
psgs=str2num(get(handles.psgs, 'String'));  
tgs=str2num(get(handles.tgs, 'String'));  
hum=str2num(get(handles.hum, 'String'));  
rck=str2num(get(handles.rck, 'String'));  
mpp=str2num(get(handles.mpp, 'String'));  
tcr=str2num(get(handles.tcr, 'String'));  
alim=str2num(get(handles.alim, 'String'));  
tph=str2num(get(handles.tph, 'String'));  
tela=str2num(get(handles.tela, 'String'));  
telb=str2num(get(handles.telb, 'String'));  
te2=str2num(get(handles.te2, 'String'));  
te3=str2num(get(handles.te3, 'String'));  
te4=str2num(get(handles.te4, 'String'));  
ttp=str2num(get(handles.ttp, 'String'));  
tpe=str2num(get(handles.tpe, 'String'));  
psar=str2num(get(handles.psar, 'String'));  
pdar=str2num(get(handles.pdar, 'String'));  
tch=str2num(get(handles.tch, 'String'));  
tar=str2num(get(handles.tar, 'String'));  
Qf17=str2num(get(handles.f17, 'String'));  
Qf18=str2num(get(handles.f18, 'String'));  
Qf19=str2num(get(handles.f19, 'String'));  
Qf20=str2num(get(handles.f20, 'String'));  
Qf21=str2num(get(handles.f21, 'String'));  
pf17a=str2num(get(handles.pf17a, 'String'));  
pf17b=str2num(get(handles.pf17b, 'String'));
```



```
pf18a=str2num(get(handles.pf18a,'String'));
pf18b=str2num(get(handles.pf18b,'String'));
pf19=str2num(get(handles.pf19,'String'));
pf20=str2num(get(handles.pf20,'String'));
pf21=str2num(get(handles.pf21,'String'));
tamb=str2num(get(handles.tamb,'String'));
vv=str2num(get(handles.vv,'String'));
pal=str2num(get(handles.pal,'String'));
taeal=str2num(get(handles.taeal,'String'));
sio2=str2num(get(handles.sio2,'String'));
al2o3=str2num(get(handles.al2o3,'String'));
fe2o3=str2num(get(handles.fe2o3,'String'));
cao=str2num(get(handles.cao,'String'));
mgo=str2num(get(handles.mgo,'String'));
tk=str2num(get(handles.tk,'String'));
o2h=str2num(get(handles.o2h,'String'));
mcomb=str2num(get(handles.comb,'String'));
tcomb=str2num(get(handles.tcomb,'String'));
mpp=str2num(get(handles.mpp,'String'));
kkrec=str2num(get(handles.kkrec,'String'));
ta2=str2num(get(handles.ta2,'String'));
tshkk=str2num(get(handles.tshkk,'String'));
I=get(handles.res,'String');
vaciosn=isempty(Responsable);
if vaciosn==1
    b='Ingrese nombre de responsable';
    set(handles.res,'String',b);
    set(handles.res,'BackgroundColor','red');
else

%Nombre de la pestaña de excel
Dia=clock;
Fecha=sprintf('%d-%d-%d',Dia(3),Dia(2),Dia(1));

%Datos

pf17a=pf17a*760/1013.25;
pf17b=pf17b*760/1013.25;
pf18a=pf18a*760/1013.25;
pf18b=pf18b*760/1013.25;
pf19=pf19*760/1013.25;
pf20=pf20*760/1013.25;
pf21=pf21*760/1013.25;
Qf17=(Qf17/2)*((pf17a+patm)/760)*((273)/(273+taeal))+((Qf17/2)*((pf17b+pat
m)/760)*((273)/(273+taeal)));
Qf18=(Qf18/2)*((pf18a+patm)/760)*((273)/(273+taeal))+((Qf18/2)*((pf18b+pat
m)/760)*((273)/(273+taeal)));
Qf19=Qf19*((pf19+patm)/760)*((273)/(273+taeal));
Qf20=Qf20*((pf20+patm)/760)*((273)/(273+taeal));
Qf21=Qf21*((pf21+patm)/760)*((273)/(273+taeal));
pal=pal*10;
x1=(143.438+(143.438^2-4*((pal-1584)/0.029))^(1/2))/2;
x2=(143.438-(143.438^2-4*((pal-1584)/0.029))^(1/2))/2;
if x1>=x2
    mal=x1;
else
```



```
    mal=x2;
end
af27=3.1416*df27^2/4;
ags=3.1416*dgs^2/4;
dco2=1.033*(10^4)/((273)*(848/44));
do2=1.033*(10^4)/((273)*(848/32));
dn2=1.033*(10^4)/((273)*(848/28));
densgs=dco2*co2/100+do2*o2/100+dn2*(100-co2-o2)/100;

%Datos de salida balance masico

mcrudoseco=alim-(alim*hum/100);
mcrudohum=alim*hum/100;
maenfriamiento=(Qf17+Qf18+Qf19+Qf20+Qf21)*densairen;
mal=mal*60*densal;
mclinker=alim/rck;
mpolvoperd=alim*mpp/100;
densar=densairen*((psar+patm*10332.274528/760)/10332.274528)*((273)/(273+
tch));
var=4.43*sqrt(pdar/densar);
mar=var*af27*3600*densar;
densgs=densgs*((psgs+patm*10332.274528/760)/10332.274528)*((273)/(273+tgs
));
velgs=4.43*sqrt(pdgs/densgs);
mgs=velgs*ags*3600*densgs;
maf=(o2-o2h)/(21-
o2)*(mgs/densgs)*densairen*((psgs+patm*10332.274528/760)/10332.274528)*((
273)/(273+tgs));
mkkrec=alim/kkrec;
entradasm=mcrudoseco+mcrudohum+mcomb+mal+maenfriamiento+maf;
motros=entradasm-mclinker-mpolvoperd-mar-mgs-mkkrec;
salidas=entradasm-mclinker-mpolvoperd-mar-mgs-motros+mkkrec;

%Cálculo intermedio

cpcomb=0.41+0.00043*((tcomb+tamb))/2;
cpcrudo=0.21+0.00007*(tcr+tamb)/2;
cpkk=0.18+0.000071*(tk+tamb)/2;
cppkk=0.18+0.000071*(tar+tamb)/2;
cpg=0.23+0.00005*(tamb+tgs)/2;
cpa=0.247+4.4*0.00001*(taeal+tamb)/2;
cpar=0.247+4.4*0.00001*(tar+tamb)/2;
cppolvo=0.23+1.2*0.0001*((tgs+tamb)/2)-3.076/((273+(tgs+tamb)/2));
G=9*H/100+H2O/100;
pcinf=pcsup-597*G;
E=0.85;
lh=57.1;
dh=4.179;
Ae1A=81.948;
Ae1B=81.948;
Ae2=105.754;
Ae3=128.567;
Ae4=122.536;
Atub=585.612;
Ahorno=3.1416*dh*lh;
Aenfr=238.798;
```



%Datos de salida balance energético

```
qscomb=mcomb*(tcomb-tamb)*cpcomb;
qcomb=mcomb*pcinf;
qalim=alim*cpcrudo*(tcr-tamb);
qae=maenfriamiento*cpa*(taeal-tamb);
qal=mal*cpa*(taeal-tamb);
entradase=qscomb+qcomb+qalim+qal+qae;
qreac=(4.11*al2o3+6.48*mgo+7.646*cao-5.116*sio2-
0.59*fe2o3)*(mkkrec+mclinker);
qskk=mclinker*cpkk*(tk-tamb);
qspkk=mkkrec*cppkk*(tar-tamb);
qsgs=cpg*(tgs-tamb)*mgs;
qsar=cpar*(mar)*(tar-tamb);
qrh=E*4.87*(10^(-8))*((273+tph)^4-(273+tamb)^4)*Ahorno;
qrela=E*4.87*(10^(-8))*((273+tela)^4-(273+tamb)^4)*Ae1A;
qrelb=E*4.87*(10^(-8))*((273+telb)^4-(273+tamb)^4)*Ae1A;
qre2=E*4.87*(10^(-8))*((273+te2)^4-(273+tamb)^4)*Ae2;
qre3=E*4.87*(10^(-8))*((273+te3)^4-(273+tamb)^4)*Ae3;
qre4=E*4.87*(10^(-8))*((273+te4)^4-(273+tamb)^4)*Ae4;
qrtp=E*4.87*(10^(-8))*((273+ttp)^4-(273+tamb)^4)*Atub;
qrenf=E*4.87*(10^(-8))*((273+tpe)^4-(273+tamb)^4)*Aenfr;
qrp=qrela+qrelb+qre2+qre3+qre4+qrtp;
if vv<=3
    qch=80.33*((273+tph)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(tph-
tamb)^(1.333)*Ahorno;
    qcela=80.33*((273+tela)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(tela-
tamb)^(1.333)*Ae1A;
    qcelb=80.33*((273+telb)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(telb-
tamb)^(1.333)*Ae1B;
    qce2=80.33*((273+te2)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(te2-
tamb)^(1.333)*Ae2;
    qce3=80.33*((273+te3)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(te3-
tamb)^(1.333)*Ae3;
    qce4=80.33*((273+te4)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(te4-
tamb)^(1.333)*Ae4;
    qctub=80.33*((273+ttp)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(ttp-
tamb)^(1.333)*Atub;
    qcenf=80.33*((273+tpe)+(273+tamb))/2)^(-0.724)*(tpe-
tamb)^(1.333)*Aenfr
else
    qch=28.03*((273+tph)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*dh^(-
0.195)*(tph-tamb)*Ahorno;
    qcela=28.03*((273+tela)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*de1a^(-
0.195)*(tela-tamb)*Ae1A;
    qcelb=28.03*((273+telb)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*de1b^(-
0.195)*(telb-tamb)*Ae1B;
    qce2=28.03*((273+te2)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*de2^(-
0.195)*(te2-tamb)*Ae2;
    qce3=28.03*((273+te3)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*de3^(-
0.195)*(te3-tamb)*Ae3;
    qce4=28.03*((273+te4)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*de4^(-
0.195)*(te4-tamb)*Ae4;
    qctub=28.03*((273+ttp)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*dtub^(-
0.195)*(ttp-tamb)*Atub;
```



```
qcenf=28.03*(( (273+tpe)+(273+tamb))/2)^(-0.351)*(vv^(0.805))*denf^(-
0.195)*(tpe-tamb)*Aenfr;
end
qcp=qcela+qcelb+qce2+qce3+qce4+qctub+qcenf;
qh=qrh+qch;
qpre=qrela+qrelb+qre2+qre3+qre4+qcela+qcelb+qce2+qce3+qce4+qctub+qrtp;
qenf=qrenf+qcenf;
qpa=mpolvoperd*cppolvo*(tgs-tamb);
entalp=[0,597.27;10,591.55;20,585.83;30,580.2;40,574.5;50,568.9;60,563.16
;70,557.33;80,551.44;90,545.27;100,539.05];

for i=2:11
    if tcr <= entalp(I,1)
        hag=((entalp(I,2)-entalp(i-1,2))/(entalp(I,1)-entalp(i-
1,1)))*(tcr-entalp(i-1,1))+entalp(i-1,2)
        break
    else
        hag=((entalp(10,2)-entalp(9,2))/(entalp(10,1)-entalp(9,1)))*(tcr-
entalp(9,1))+entalp(9,2);
    end
end
qea=mcrudohum*hag;
salidase=qreac+qskk+qsgs+qsar+qpa+qea+qh+qpre+qenf+qspkk;
otrose=entradase-salidase;
salidase=entradase;

%Cambio a toneladas
mcrudoseco=mcrudoseco/1000;
mcrudohum=mcrudohum/1000;
mcomb=mcomb/1000;
maenfriamiento=maenfriamiento/1000;
mal=mal/1000;
mafpm=mafpm/1000;
mclinker=mclinker/1000;
mpolvoperd=mpolvoperd/1000;
mar=mar/1000;
mgs=mgs/1000;
motros=motros/1000;
mkkrec=mkkrec/1000;
entradasm=entradasm/1000;
salidasm=salidasm/1000;
% Calores para el rendimiento del enfriador
cpkksh=0.18+0.000071*(tshkk+tamb)/2;
qente=(mkkrec+mclinker)*cpkksh*(tshkk-tamb);
cpa2=0.247+4.4*0.00001*(ta2+tamb)/2;
ma2=maenfriamiento-mar;
qsale=ma2*cpa2*(ta2-tamb);
efenf=100*qsale/qente
%Abrir ventanas
ventanal;
end
```



XXVI.XX. Codificación antes del cargado de la ventana “ventana1”

```
% --- Executes just before ventana1 is made visible.
Function ventana1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to ventana1 (see VARARGIN)
movegui(hObject, 'center')
imagen=imread('guapan.jpg');
image(imagen);
axis off;
format short;
%Globalización de variables
global both
    %Unidades
global menm
global mene

    %Datos de balance masico
global mcrudoseco
global mcrudohum
global mcomb
global maenfriamiento
global mal
global mafp
global entradasm
global mclinker
global mpolvoperd
global mar
global mgs
global motros
global mkkrec
global salidasm

    %Datos de balance térmico

global qscomb
global qcomb
global qalim
global qal
global qae
global entradase
global qreac
global qskk
global qsgs
global qsar
global qpa
global qea
global qh
global qpre
global qenf
global qspkk
global otrose
global salidase
```



```
%Rendimiento
global efenf
%Balance de energía
switch mene
    case 'kcal/dia'
        qscomb=qscomb*24;
        otrose=otrose*24;
        qcomb=qcomb*24;
        qalim=qalim*24;
        qal=qal*24;
        qae=qae*24;
        entradase=entradase*24;
        greac=greac*24;
        qskk=qskk*24;
        qsgs=qsgs*24;
        qsar=qsar*24;
        qpa=qpa*24;
        qea=qea*24;
        qh=qh*24;
        qpre=qpre*24;
        qenf=qenf*24;
        qspkk=qspkk*24;
        salidase=salidase*24;
    case 'kcal/h'
    case 'kcal/kgkk'
        qscomb=qscomb/(1000*(mkkrec+mclinker));
        otrose=otrose/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qcomb=qcomb/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qalim=qalim/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qal=qal/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qae=qae/(1000*(mkkrec+mclinker));
        entradase=entradase/(1000*(mkkrec+mclinker));
        greac=greac/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qskk=qskk/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qsgs=qsgs/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qsar=qsar/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qpa=qpa/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qea=qea/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qh=qh/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qpre=qpre/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qenf=qenf/(1000*(mkkrec+mclinker));
        qspkk=qspkk/(1000*(mkkrec+mclinker));
        salidase=salidase/(1000*(mkkrec+mclinker));
end
set(handles.e1, 'string',mene)
set(handles.e2, 'string',mene)
set(handles.e3, 'string',mene)
set(handles.e4, 'string',mene)
set(handles.e5, 'string',mene)
set(handles.e6, 'string',mene)
set(handles.e7, 'string',mene)
set(handles.e8, 'string',mene)
set(handles.e9, 'string',mene)
set(handles.e10, 'string',mene)
set(handles.e11, 'string',mene)
```



```
set(handles.e12,'string',mene)
set(handles.e13,'string',mene)
set(handles.e14,'string',mene)
set(handles.e15,'string',mene)
set(handles.e16,'string',mene)
set(handles.e18,'string',mene)
set(handles.e19,'string',mene)
%Balance de masa
switch menm
    case 'kg/dia'
        mcrudoseco=mcrudoseco*24000;
        mcrudohum=mcrudohum*24000;
        mcomb=mcomb*24000;
        maenfriamiento=maenfriamiento*24000;
        mal=mal*24000;
        mafp=mafp*24000;
        entradasm=entradasm*24000;
        mclinker=mclinker*24000;
        mgs=mgs*24000;
        mar=mar*24000;
        mkkrec=mkkrec*24000;
        mpolvoperd=mpolvoperd*24000;
        motros=motros*24000;
        salidasm=salidasm*24000;
    case 't/dia'
        mcrudoseco=mcrudoseco*24;
        mcrudohum=mcrudohum*24;
        mcomb=mcomb*24;
        maenfriamiento=maenfriamiento*24;
        mal=mal*24;
        mafp=mafp*24;
        entradasm=entradasm*24;
        mclinker=mclinker*24;
        mgs=mgs*24;
        mar=mar*24;
        mkkrec=mkkrec*24;
        mpolvoperd=mpolvoperd*24;
        motros=motros*24;
        salidasm=salidasm*24;
    case 'kg/h'
        mcrudoseco=mcrudoseco*1000;
        mcrudohum=mcrudohum*1000;
        mcomb=mcomb*1000;
        maenfriamiento=maenfriamiento*1000;
        mal=mal*1000;
        mafp=mafp*1000;
        entradasm=entradasm*1000;
        mclinker=mclinker*1000;
        mgs=mgs*1000;
        mar=mar*1000;
        mkkrec=mkkrec*1000;
        mpolvoperd=mpolvoperd*1000;
        motros=motros*1000;
        salidasm=salidasm*1000;
    case 'kg/kgkk'
        sumakk=mclinker+mkkrec;
        mcrudoseco=mcrudoseco/sumakk;
```



```
mcrudohum=mcrudohum/sumakk;  
mcomb=mcomb/sumakk;  
maenfriamiento=maenfriamiento/sumakk;  
ma1=ma1/sumakk;  
mafpm=mafpm/sumakk;  
entradasm=entradasm/sumakk;  
mclinker=mclinker/sumakk;  
mgs=mgs/sumakk;  
mar=mar/sumakk;  
mkkrec=mkkrec/sumakk;  
mpolvoperd=mpolvoperd/sumakk;  
motros=motros/sumakk;  
salidas=salidas/sumakk;  
  
end  
set(handles.u1, 'string', menm)  
set(handles.u2, 'string', menm)  
set(handles.u3, 'string', menm)  
set(handles.u4, 'string', menm)  
set(handles.u5, 'string', menm)  
set(handles.u6, 'string', menm)  
set(handles.u7, 'string', menm)  
set(handles.u8, 'string', menm)  
set(handles.u9, 'string', menm)  
set(handles.u10, 'string', menm)  
set(handles.u11, 'string', menm)  
set(handles.u12, 'string', menm)  
set(handles.u13, 'string', menm)  
set(handles.u15, 'string', menm)  
%Resultados balance másico  
  
set(handles.crudo, 'string', mcrudoseco)  
set(handles.crudohum, 'string', mcrudohum)  
set(handles.comb, 'string', mcomb)  
set(handles.a1, 'string', ma1)  
set(handles.af, 'string', mafpm)  
set(handles.ae, 'string', maenfriamiento)  
set(handles.entradasm, 'string', entradasm)  
set(handles.clinker, 'string', mclinker)  
set(handles.ar, 'string', mar)  
set(handles.gs, 'string', mgs)  
set(handles.ps, 'string', mpolvoperd)  
set(handles.mkkrec, 'string', mkkrec)  
set(handles.salidas, 'string', salidas)  
set(handles.pi, 'string', motros)  
  
%Resultados balance 212linker212c  
set(handles.cscmb, 'string', qscmb)  
set(handles.ccomb, 'string', qcomb)  
set(handles.cscs, 'string', qalim)  
set(handles.cal, 'string', qal)  
set(handles.cae, 'string', qae)  
set(handles.entradas, 'string', entradas)  
set(handles.calreac, 'string', qreac)  
set(handles.csc, 'string', qskk)  
set(handles.csgs, 'string', qsgs)  
set(handles.cca, 'string', qca)  
set(handles.cpre, 'string', qpre)
```



```
set(handles.cppc, 'string',qh)
set(handles.qenf, 'string',qenf)
set(handles.qspkk, 'string',qspkk)
set(handles.ap, 'string',qpa)
set(handles.csar, 'string',qsar)
set(handles.salidase, 'string',salidase)
set(handles.otrose, 'string',otrose)
% Balance 213linker del horno
bth=100*(qreac/salidase);
set(handles.bth, 'string',bth)
set(handles.efenf, 'string',efenf)
```

XXVI.XXI. Codificación del botón “Guardar” de la ventana “ventana1”

```
% --- Executes on button press in Guardar.
Function Guardar_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Globalización de variables
global bth
global efenf
global Responsable
    %Fecha
global Fecha
    %Unidades
global menm
global mene

    %Datos de balance másico
global mcrudoseco
global mcrudohum
global mcomb
global maenfriamiento
global mal
global mafp
global mafar
global entradasm
global mclinker
global mpolvoperd
global mar
global mgs
global motros
global mkkrec
global salidasm

    %Datos de balance térmico

global qscomb
global qcomb
global qalim
global qa1
global qae
global entradase
global qreac
global qskk
global qsgs
global qsar
```




```
%Datos de balance térmico
```

```
global entradase  
global qreac  
global qskk  
global qsgs  
global qsar  
global qpa  
global qea  
global qh  
global qpre  
global qenf  
global qspkk  
global otrose  
global mene
```

```
%Energía de otros
```

```
ppo=otrose;
```

```
%Energía en las paredes
```

```
perdxcpp=qh+qenf+qpre;
```

```
%Energía en los gases de salida
```

```
gs=qsgs+qea+qpa;
```

```
%Balance energético
```

```
set(handles.ent,'string',entradase)  
set(handles.gs,'string',gs)  
set(handles.cc,'string',(qskk+qspkk))  
set(handles.cpp,'string',perdxcpp)  
set(handles.u,'string',qreac)  
set(handles.o,'string',ppo)  
set(handles.ar,'string',qsar)
```

```
%Unidades
```

```
set(handles.ue1,'string',mene)  
set(handles.ue2,'string',mene)  
set(handles.ue3,'string',mene)  
set(handles.ue4,'string',mene)  
set(handles.ue5,'string',mene)  
set(handles.ue6,'string',mene)
```

XXVI.XXII. Codificación del botón “Guardar” de la ventana “Diagrama_de_Sankey”

```
% --- Executes on button press in Guardar.  
Function Guardar_Callback(hObject, eventdata, handles)  
I = getframe(Diagrama_de_Sankey);  
figure  
a=cd;  
d=cd('./Sankey/');  
saveas(imshow(I.cdata),date,'jpg')  
cd(a);  
close
```

Anexo XXVII

Termografías en el pre-calentador

