

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Guía:**  
Eduardo Balladares V.

**Ingeniero Supervisor:**  
Gustavo Ramírez G.

**“BALANCE DE ENERGÍA EN BATERÍA PLANTA COQUE  
COMPAÑÍA SIDERÚRGICA HUACHIPATO”**

**ANÍBAL A. RODRÍGUEZ SAN MARTÍN**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

*Enero 2025*

*Dedicado a mi familia  
Por y para ustedes.*

## Sumario

El acero es una aleación de hierro-carbono, que se destaca por su versatilidad ya que forma parte de la gran mayoría de nuestro entorno. Actualmente, el mercado global del acero está controlado por China y afecta la participación de varias compañías en el mercado. En cuanto a Chile, durante varios décadas el principal productor y exportador fue la Compañía Siderúrgica Huachipato, ubicada en la bahía de San Vicente, comuna de Talcahuano, Región del Bio Bio. Existen cuatro secciones fundamentales para la producción del acero, observables en la gran mayoría de siderurgias, estas son: Planta de Coque, Altos Hornos, Acería y Colada Continua, y Laminadores. Cada sección produce: combustibles, arrabio, acero, producto comercial, correspondientemente. En general, las plantas de coque se subdividen en tres áreas de trabajo, manejo de carbón, encargado de acopio y suministro de materia prima, batería, edificio refractario encargado de coquizarse la mezcla de carbones, a través de pirólisis en ausencia de oxígeno dentro de los hornos mediante proceso batch. Por último, en la unidad de subproductos es tratado el gas coque producido en los hornos, donde se recuperan subproductos de éste tales como naftaleno, ácido sulfhídrico, alquitrán, amoníaco, y gas mezcla principal combustible para la operación de las máquinas de forma general dentro de toda la planta, la unidad de interés para el proyecto es la batería, donde ocurre la coquización, con una configuración de 58 hornos y 59 muros de combustión, para suministrar el calor necesario del proceso. Adyacentes a los hornos, se sitúan muros de combustión a cada lado del horno, encargados de suministrar la energía necesaria para que ocurra la coquización. Cada muro de combustión tiene asociado un equipo encargado de evacuar los gases de combustión denominados *Waste Heat*, mediante un sensor reporta el valor del %O<sub>2</sub> en los gases quemados, clave en el desarrollo de este proyecto. Mediante dos cajas negras separadas se establecen relaciones de balance para el muro, donde el calor aportado corresponde a la combustión y consumos tales como calor sensible de gases salida y pérdidas. La diferencia corresponderá al calor disponible para el horno, a su vez, el balance para el horno involucra el aporte de calor del muro y consumos, calor sensible de gases, calor arrastrado por coque, pérdidas donde la diferencia es el calor disponible para el proceso de coquización, estimado en 23 Gcal/h. Debido a la constante operación de la batería es necesario llevar controles frecuentes y certeros en los diversos equipos para la correcta operación y producción, además de minimizar las pérdidas energéticas, finalmente se incluyen unas breves recomendaciones.

## Abstract

Steel is an iron-carbon alloy which outstands by its versatility being found in everything around us. The steel global market is controlled by China affecting the participation of several companies in the market, the former main producer and exporter of steel in Chile was Compañía Siderúrgica Huachipato, located by San Vicente bay in Talcahuano, Bio Bio region. The craft of steel is divided into four large fundamental areas: the Coke Plant, Blast Furnaces, Steel Mills and Continuous Casting, and Rolling Mills where the final product is obtained. Each one gets the key products like fuels, cast iron, steel, and final product, correspondently. Particularly, the most of Coque plants are divided into three working areas, coal handling, collection manager and raw material supply, battery, a refractory building in charge of coking the coals mixture through pyrolysis in the absence of oxygen inside the furnaces in batch process. Finally, the by-products unit where the coke gas produced in the furnaces is treated in order to recover its by-products such as naphthalene, hydrogen sulfide, tar, ammonia, and “gas mezcla” as main mixture for the machines operation in a general way inside the whole plant; the unit of interest for the project is the battery where the coking takes place, with a configuration of 58 furnaces and 59 combustion walls to supply the required heat for the process; these combustion walls are adjacent to each side of the furnaces in charge to provide the required energy so that the coking takes place; an associated equipment to each combustion wall is in charge of evacuating the combustion gases called *Waste Heat* through a sensor that reports the %O<sub>2</sub> value in burnt gases, key for the development of this project; the balance relationships for the wall are established through two separated black boxes, the heat provided corresponds to the combustion and sensible heat consumption of output gases and lost, the difference will correspond to the available heat for the furnace. At the same time, the balance for the furnace involves the wall heat input and sensible heat consumption of gases, dragged heat by coke, losses where the balance is the available heat for the coking process, estimated in 23Gcal/h. It is necessary to do frequent controls in the equipment to take care of the process and assure the steel quality. Finally, some brief recommendations are included.

# Índice

<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 Antecedentes .....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 3 Metodología.....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 4 Resultados y Discusiones .....</b>	<b>30</b>
<b>Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>54</b>
<b>Capítulo 6 Glosario .....</b>	<b>57</b>
<b>Capítulo 7 Bibliografía .....</b>	<b>58</b>
<b>Capítulo 8 Referencias .....</b>	<b>59</b>
<b>Capítulo 9 Anexos .....</b>	<b>60</b>
<b>Capítulo 10 Resumen FI .....</b>	<b>69</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición típica de GAHE, utilizado en CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.....	17
Tabla 2. Composición de gases quemados para un flujo de aire estequiométrico, GAHE. Fuente: Confección Propia. ....	17
Tabla 3. Principales reacciones en muros de combustión, batería CSH. Fuente: Confección Propia.....	18
Tabla 4. Condiciones operacionales del periodo 1 entre 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.....	32
Tabla 5. Balance másico para batería de CSH, en el periodo 1. Fuente: Confección Propia.....	33
Tabla 6. Desglose de gases producidos por el Horno de Coquización de CSH, periodo 1. Fuente: Confección Propia. ....	33
Tabla 7. Balance energético de muro combustión en CSH. periodo 1, Fuente: Confección Propia. ....	34
Tabla 8. Calor involucrado en las reacciones de combustión del muro, en periodo 1 en CSH. Fuente: Confección Propia.....	36
Tabla 9. Balance energético del horno de coquización en CSH para el periodo 1. Fuente: Confección Propia. ....	36
Tabla 10. Condiciones operacionales comprendidas para el segundo periodo de interés comprendido entre 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia. ....	37
Tabla 11. Balance másico en batería de CSH, en el periodo 2. Fuente: Confección Propia.....	38
Tabla 12. Desglose de gases producidos por el horno de coquización de CSH, periodo 2. Fuente: Confección Propia. ....	39
Tabla 13. Balance energético de Muro Combustión en CSH para el periodo 2. Fuente: Confección Propia. ....	40
Tabla 14. Balance energético de horno de coquización en CSH para el periodo 2. Fuente: Confección Propia. ....	41
Tabla 15. Condiciones operacionales comprendidas para el tercer periodo de interés comprendido entre 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia. ....	42
Tabla 16. Balance másico para batería de CSH, en el periodo 3. Fuente: Confección Propia.....	43
Tabla 17. Desglose de gases producidos en horno de coquización de CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia. ....	44
Tabla 18. Comparativa entre producción de gas coque, según ritmo de empuje en CSH. Fuente: Confección Propia....	45
Tabla 19. Balance energético muro de combustión en CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia. ....	45
Tabla 20. Balance energético de Horno de coquización en CSH para el periodo 3. Fuente: Confección Propia. ....	46
Tabla 21. Condiciones operacionales del periodo 4 entre 25/01/24 al 25/02/24 en CSH. Fuente: Confección propia. ....	47
Tabla 22. Balance másico para batería de CSH, en el periodo 4. Fuente: Confección Propia.....	49
Tabla 23. Desglose de gases producidos en horno de coquización de CSH, periodo 4. Fuente: Confección Propia. ....	50
Tabla 24. Balance energético de muro Combustión en CSH, periodo 4. Fuente: Confección Propia. ....	51
Tabla 25. Balance energético de horno de coquización en CSH para el periodo 3. Fuente: Confección Propia. ....	52
Tabla 26. Principales variables de operación y calor de coquización referido a cada periodo y condiciones presentes en batería de CSH. Fuente: Confección Propia.....	53
Tabla 27 Anexo-1. Composición flujo GAHE, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia. ....	60
Tabla 28 Anexo-2. Composición flujo de gases quemados, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.....	60

<i>Tabla 29 Anexo-3. Parámetros de operación utilizados en la mezcla de GAHE, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	61
<i>Tabla 30 Anexo-4. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	61
<i>Tabla 31 Anexo 5. Composición flujo GAHE, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	62
<i>Tabla 32 Anexo-6. Composición flujo Gases Quemados, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	62
<i>Tabla 33 Anexo-7. Parámetros de operación utilizados en la mezcla de GAHE, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	63
<i>Tabla 34 Anexo-8. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	63
<i>Tabla 35 Anexo-9. Composición flujo GAHE, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	64
<i>Tabla 36 Anexo-10. Composición flujo Gases Quemados, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	64
<i>Tabla 37 Anexo-11. Parámetros de operación utilizados en la mezcla de GAHE, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	65
<i>Tabla 38 Anexo-12. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	65
<i>Tabla 39 Anexo-13. Composición flujo GAHE, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	66
<i>Tabla 40 Anexo 14. Composición flujo Gases Quemados, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	66
<i>Tabla 41 Anexo-15. Composición flujo GAHE, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	67
<i>Tabla 42 Anexo-16. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	67

## Índice de Figuras

<i>Figura 1. Temperatura transversal de muro. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.</i>	10
<i>Figura 2. Mapa de sección batería, subproductos, manejo de carbón, CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.</i>	12
<i>Figura 3. Configuración de Batería CSH, distribución de hornos y muros. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.</i>	13
<i>Figura 4. Diagrama de bloques de horno de coquización, Batería CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	14
<i>Figura 5. Diagrama de bloque del Muro de Combustión, Batería CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	16
<i>Figura 6. Planos de Stand Pipe, colectora de gases de CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.</i>	23
<i>Figura 7. Representación gráfica de waste heat, distribución y operación de CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.</i>	25
<i>Figura 8. Distribución de la masa de gases en el horno de coquización en CSH, periodo 1. Fuente: Confección Propia.</i>	34
<i>Figura 9. Distribución de energía consumida en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 1. Fuente: Confección Propia.</i>	35
<i>Figura 10. Balance de energía para el horno de CSH, periodo 1. Fuente: Confección Propia.</i>	37
<i>Figura 11. Distribución de gases producto durante el periodo 1, en hornos de coquización de CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	39
<i>Figura 12. Distribución de gases producto durante el periodo 2, en hornos de coquización de CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	40
<i>Figura 13. Distribución de energía consumida en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 2. Fuente: Confección Propia.</i>	41
<i>Figura 14. Balance de energía para el horno de CSH, período 2. Fuente: Confección Propia.</i>	42
<i>Figura 15. Distribución de la masa de gases en horno de coquización en CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.</i>	44
<i>Figura 16. Distribución de energía utilizada en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.</i>	46
<i>Figura 17. Balance de energía para el horno de CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.</i>	47
<i>Figura 18. Distribución de la masa de gases producidos en horno de coquización para un ritmo de empuje correspondiente a 63 hornos/día, en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	48
<i>Figura 19. Distribución de la masa de gases producidos en horno de coquización para un ritmo de empuje correspondiente a 60 hornos/día, en CSH. Fuente: Confección Propia.</i>	49
<i>Figura 20. Distribución de la masa de gases en horno de coquización en CSH, periodo 4. Fuente: Confección Propia.</i>	50
<i>Figura 21. Distribución de energía consumida en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 4. Fuente: Confección propia.</i>	51
<i>Figura 22. Balance de energía para el horno de CSH, periodo 4. Fuente: Confección Propia.</i>	52

*Figura 23. Calor disponible para coquización, para cada periodo según sus condiciones operacionales presentes, para la batería de CSH. Fuente: Confección Propia.....53*

*Figura 24 Anexo-17. Estimación de pérdidas de calor durante calentamiento de batería CSH sin empuje de hornos. Fuente: Confección Propia.....68*

## Capítulo 1 Introducción

El acero es una mezcla principalmente de hierro, carbono junto algunos aleantes que le otorgan distintas propiedades, según el requerimiento técnico del material en cuanto aplicación y uso, debido a su versatilidad y resistencia ha sido un producto de confianza y preferencia por los humanos desde la antigüedad.

El acero está expandiendo constantemente su mercado internacional, el cual está fuertemente controlado por la industria china. El “gigante asiático” ofrece su producto a menor costo en comparación a otros productores. Debido a la agresividad con la que el acero chino se posicionó en el mercado global, ha afectado fuertemente a otros productores, especialmente Chile, donde Aceros CAP fue el principal afectado al ser el principal representante nacional [1,2].

La Compañía Siderúrgica Huachipato (CSH), empresa nacional, inaugurada en 1950 perteneciente al grupo CAP, ubicada en la Octava Región del Biobío, aledaña a la bahía de San Vicente, perteneciente a la comuna de Talcahuano, registro desde el año 2009 pérdidas multimillonarias, debido a la feroz competencia por parte de China [3].

CSH reestructuró su modelo de negocios, en su momento buscando la circularidad del producto vendido a través de sus clientes, principalmente mineros, entregaba un producto adecuado según las necesidades, el plan de negocios reintegra el producto fabricado por Huachipato, asegurando el uso de chatarra de calidad [4].

Huachipato, impulso programas donde buscaba un producto final con menor huella de carbono e impacto social en las comunidades durante la producción. Para mejorar el panorama financiero se buscaba minimizar consumos a lo largo del proceso de producción, con el fin de optimizar su producción [5].

Dentro de la producción del acero, en general existen diversas etapas, siendo la planta de coque, la de interés, principal productor de combustibles para la planta en general, pues además del coque producido, utilizado en altos hornos para la producción de arrabio, también se produce gas coque, combustible de alto rendimiento y poder calorífico, utilizado en varios procesos ligados a la producción de acero [6].

El gas coque es refrigerado y tratado, separando impurezas tales como alquitrán, naftaleno, ácido sulfhídrico y amoníaco, y acondicionándolo para el correcto uso de combustible en los diversos procesos de producción primaria.

Una vez tratado el gas coque crudo en planta de subproductos se denomina gas mezcla, al ser un subproducto de la coquización en la batería, su producción es abundante, de manera que se aprovecha como combustible. Además, al contar con poder calorífico superior al gas del alto horno, es mezclado para ser utilizado en la batería. Procesos tales como planta de cal, altos hornos, calderas y regeneradores de calor, entre otros, son operados con gas mezcla.

El subproducto alquitrán proveniente del gas coque se utiliza en el proceso de Alto Horno como combustible auxiliar, libera energía adicional, y aumenta el porcentaje de gases reductores [8].

El lugar donde se produce coque se denomina batería, edificio refractario conformado por 58 hornos de coquización y 59 muros de combustión. El proceso de obtención de coque consta en cargar los hornos con carbón previamente importado desde Canadá y Australia el cual cumple criterios mecánicos, químicos y físicos. El tiempo de residencia en el horno se denomina tiempo de coquización y varía entre 16 y 24 horas, según la meta de producción. La batería se encuentra a una temperatura objetivo entre 1240-1300 °C, alcanzada mediante los muros de combustión.

Parámetros como CSR, Coke Strength after Reaction y CRI, Coke Reactivity Index, de principal seguimiento, verifican la calidad del coque final ocupado en los altos hornos, indicando cuánto coque no se degrada llegando de manera íntegra al crisol y cuánto coque reacciona desde la carga al crisol de alto horno, respectivamente.

Existen valores adecuados para estos parámetros, los cuales son requeridos para el coque, pues garantiza el cumplimiento de condiciones tales como soportar la carga en altos hornos y ser agente reductor del proceso, condicionando la calidad del arrabio producido en altos hornos.

Se establece un balance de masa mediante Excel®, requerido para identificar y cuantificar corrientes involucradas en el proceso, mediante las masas involucradas procede el balance energético a través del mismo *software*.

Resultados sobre dicho balance permitirán apoyar la toma de decisiones de la compañía especialmente atendiendo a la variabilidad en las condiciones operacionales y climáticas del entorno operacional a lo largo del año.

La humedad presente en la mezcla de carbones es un factor clave a considerar, pues al ser almacenado en la intemperie, esta varía según la estación del año, influyendo directamente en la energía necesaria para la operación.

### **Objetivo General**

Determinar la cantidad de energía requerida para el proceso de coquización, incorporando la humedad del carbón como variable operacional, pues condiciona la cantidad de energía empleada para la producción de coque, condicionando directamente el costo operacional.

### **Objetivos Específicos**

1.- Seleccionar y analizar data e información sobre condiciones de operación y ambientales que sean de interés para el proceso, además de integrarse al equipo de ejecución de la batería.

2.- Realizar balance de masa para identificar y cuantificar flujos de interés, luego balance de energía, donde se estimará la energía desperdiciada involucrada en el proceso, mediante la diferencia de cálculos teóricos con antecedentes de operación.

3.- Analizar resultados, establecer conclusiones y recomendaciones relevantes para el proceso general de coquización.

## Capítulo 2 Antecedentes

En general las plantas de coque están compuestas principalmente por tres unidades, complementadas entre sí para la producción de coque las cuales considera, *subproductos, batería y carbón*. La unidad de carbón encargada de acopiar carbón, proveniente en embarcaciones al puerto aledaño, mezcla y surte la materia prima a la batería, unidad encargada de transformar la materia prima en el producto final coque, y subproductos encargados de acopiar, limpiar y recuperar productos gaseosos de la coquización en batería.

La unidad encargada de realizar la mezcla de carbones hacia la batería cuenta con seis tolvas que almacenan los distintos tipos de carbón utilizados para el proceso. Considera una mezcla entre tres tipos de carbón, basado en los requerimientos técnicos del producto, principalmente se utiliza carbón bituminoso hulla, importado desde Canadá y Australia [7].

Mediante correas transportadoras el carbón es conducido hacia el tope de la batería donde alimenta la máquina cargadora, la cual se desplaza libremente por el tope de la batería donde suministra la mezcla a los hornos desde arriba, tras liberar cuatro tapas metálicas, dispuesta de mar a cerro, mediante un electroimán, se introducen mangas para alimentar el horno, depositando 22 toneladas de carbón base húmeda por horno aproximadamente.

La descarga ocurre desde el lado mar donde la máquina empujadora, empuja el coque hacia el otro extremo recibido en el lado cerro de la batería, se identifican como lado mar o lado empuje, a la región oeste de la batería más cercana al mar, donde se ubica la máquina empujadora, lado cerro o lado descarga, región este de la batería donde se ubica la máquina extractora de puertas, encargada de retirar la puerta de horno para la descarga hacia el tren de apagado, encargado de recibir el coque.

Una vez terminada la carga de carbones en el horno de coquización, una barra niveladora se introduce por la parte superior del horno, libera un volumen estratégico, para la circulación de gases logrando una coquización uniforme a través de la columna de carbón.

El tiempo de coquización, se refiere al tiempo de residencia del carbón en el horno cargado para obtener coque, determinado por la relación de hornos disponibles y hornos empujados diariamente, una vez cumplido se procede a descargar el horno.

Una vez retirada la tapa del lado mar, se avisa por radio al operador del lado cerro para liberar la tapa correspondiente, liberadas ambas tapas de horno se procede a empujar el coque del horno, desde lado mar hacia lado cerro, depositándose en el tren de apagado, carro donde se deposita coque caliente para ser trasladado hacia la torre de apagado, encargada de rociar agua para disminuir la temperatura del coque.

Una vez recuperado el coque se comprueban parámetros químicos, tales como humedad, ceniza, volátiles, azufre, además de mecánicos, M40, M10 y de calidad CRI, CSR, donde la compañía alcanzó máximos valores de CSR cercanos al 69%.

El producto final coque, se traslada hacia el alto horno mediante correas transportadoras, en caso de no ser requerido, se acopia en las canchas o alrededor de la batería. Además del coque existen subproductos importantes asociados a la producción de coque, destacando el gas coque y alquitrán.

El gas coque, producto de la coquización del carbón, es transportado hacia la unidad colectora, conformada por dos ramas, norte y sur, al salir del horno, el gas atraviesa unidades encargadas de enfriarlo mediante rociado de licor amoniacal, denominadas *stand pipe*, las cuales están acopladas a la salida del horno, la colectora succiona y transporta los gases hacia la unidad de subproductos.

En planta de subproductos el gas coque es limpiado de impurezas propias del proceso, además de reducir su temperatura para una óptima distribución y almacenamiento, mediante enfriadores primarios y secundarios.

Principales impurezas por remover en este gas son, amoníaco, naftaleno, ácido sulfhídrico y alquitrán, destacando amoníaco y alquitrán, el vapor del amoníaco es burbujeado a través de bandejas donde el amoníaco se recupera por rebalse, este líquido amoniacal es utilizado para enfriar gases producto de la batería, por rociado de licor a través del *stand pipe* ubicados en lado mar.

La recuperación de alquitrán ocurre por atracción iónica, el gas coque es ionizado negativamente, al atravesar placas colectoras cargadas positivamente, se depositan las partículas de alquitrán negativas en las placas cuando el gas fluye hacia el otro extremo, el principal uso es en Alto Horno, donde se inyecta mediante toberas para potenciar el proceso en general.

El mecanismo de calentamiento de los muros consta de equipos concadenados donde el combustible principal para la operación es gas alto horno enriquecido, proveniente de la mezcla entre gas alto horno junto a gas mezcla, G.M. suministrado por planta de subproductos, al contar con mayor poder calorífico que gas alto horno potencia el poder calorífico del producto final denominado Gas Alto Horno Enriquecido, G.A.H.E.

Como el principal suministro proviene de Alto Horno, unidad aguas abajo en la producción del acero es necesario contar con un combustible de respaldo que garantice la operación, para aquellos casos se utiliza gas mezcla y en caso de escasear se ocupa gas natural.

Estos tipos de combustible al ser más potentes requieren menor flujo, por tanto, pueden presentarse situaciones de baja presión en líneas de suministro de gases, la inyección de vapor de agua o nitrógeno aumenta la presión, este último al ser inerte no interfiere en la reacción del combustible, pero sí es un recurso más caro, el fin de este es netamente regular la presión de operación.

En caso de una disminución drástica en la presión en la batería, inferiores a valores mínimos de operación, la batería alcanza un estado neutro, donde no hay quema de combustible afectando directamente la producción de coque y gas coque, pues al no quemar combustible la temperatura de la batería desciende constantemente, afectando la producción de subproductos considerablemente.

En caso de no mantener la temperatura meta, el proceso de coquización se ve afectado en cuanto a la cocción de carbones, en el peor de los casos se empujan hornos crudos. En caso de que el neutro se prolongue es considerable descargar todos los hornos minorizando pérdidas y emisiones.

Principalmente son 2 tipos de combustible utilizados para operar, GM o GAHE, solo en contingencias operacionales muy específicas se utiliza gas natural. Cada combustible requiere condiciones de operación distintas, pues el GM cuenta con mayor poder calorífico, la operación común consta en quemar GAHE en regeneradores de calor ubicados en el piso inferior de la batería, los cuales constan de cuatro ductos denominados cajas, donde dos conducen los gases producto de combustión y dos cajas encargadas de suministrar, aire y GAHE precalentados.

Para operar con GM es necesario modificar el funcionamiento del regenerador, y batería en general, pues este gas requiere de mayor cantidad de aire para combustionar, por tanto, se incrementa a dos la cantidad de cajas encargadas de suministrar aire.

Los muros de combustión constan de 30 cámaras de combustión dispuestas de mar a cerro denominadas *flues*. El mecanismo de operación para los *flues* consiste en dos series de quemado alternadas, verde y roja, donde 15 *flues* queman y el resto evacúan gases de combustión por serie de combustión, durante la operación la alternación entre series es continua.

Existe un sistema automatizado encargado de alternar estas series, cada 20 minutos, donde considera, tiempo efectivo de quema, tiempo en alternación de serie, tiempo de barrido, tiempo de advertencia y tiempo de neutro denominado pausa, este último es impuesto en función de la temperatura meta de batería, pues variar este valor incide en el tiempo efectivo de quemado.

Para la serie verde, *flues* pares queman en muros pares, para la serie roja, *flues* impares queman en muros pares, el resto de *flues* evacúan gases. Al momento de alternar la serie, se considera un tiempo de barrido encargado de descarbonizar, previniendo acumulación de gases de combustión, junto con arrastrar impurezas depositadas por dentro de las cañerías.

El diseño del *flue* consiste en un área transversal constante en la ruta de combustión de gases, desde el punto de combustión hasta el punto de inversión de flujo hacia el *flue* adyacente, por lo tanto, pérdidas de presión y las diferencias de presión se mantiene al mínimo.

El control de operación para la batería se realiza desde la sala de control, encargada de monitorear sistemas de operación, alternación, quemado, carga de carbones, y verificar parámetros de control para el correcto funcionamiento de la batería, tales como, pausa, flujo de gas, poder calorífico.

La pausa incide directamente al volumen efectivo de gas que alimenta la batería, pues al tratarse del tiempo de neutro en la batería, a menor pausa mayor volumen efectivo de combustible quemado, acercándose al flujo de gas establecido por el operador.

También es regulable el poder calorífico de GAHE, variando la relación en la mezcla de gases GM, y gas alto horno, relación estimada por Experion, software de operación de sala de control el cual realiza la mezcla en base al poder calorífico de cada gas y el flujo deseado. Resumido en las siguientes 2 relaciones.

$$\text{Flujo GAHE} = \text{Flujo GAH} + \text{Flujo GM}$$

$$\text{Flujo GAHE} * \text{PC GAHE} = \text{Flujo GAH} * \text{PC GAH} + \text{Flujo GM} * \text{PC GM}$$

La batería de CSH, operó más de 30 años de manera continua, cualquier detención afecta directamente producción de activos y la conservación del inmueble, materiales refractarios, arcilla y sílice.

Dentro del muro existe una distribución de los ladrillos refractarios, según las regiones más expuestas a cambios de temperatura principalmente se ubican en las cercanías de las puertas, donde existe un gradiente entre temperatura ambiente y temperatura interna del horno, la mejor manera de preservar propiedades y funcionamiento de refractarios es evitando variaciones de temperatura.

Es importante realizar mantenimientos preventivos periódicos sobre los muros, pues además de preservar la vida útil del horno, contribuye en la correcta distribución de temperatura, mejorando directamente en la calidad de coquización.

Verificar variables de control, revisar y ajustar parámetros según las condiciones de operación y producción impuestas, recopilar información relevante para la toma de decisiones, tales como mediciones de presión, en ambas series activa e inactiva, succiones de aire y gas, presión en el tope de batería, mediciones de temperatura, son parte de las rutinas preventivas y de control en la batería.

Dentro de las rutinas de control se priorizan muros que necesiten soldadura cerámica según inspecciones visuales realizadas por personal capacitado o según desempeño de los muros, la soldadura cerámica es un proceso donde sílice es soplado con oxígeno mediante lanzas, expulsados a alta presión, rellenando la superficie afectada, al contactar la superficie, la temperatura de esta provoca la solidificación del material.

Equipos de alta temperatura, tales como *Waste Heat*, encargadas de succionar y arrastrar los gases provenientes de la combustión dentro de los muros, a diferencia de los Stand Pipe, los cuales recolectan gases de los hornos de coquización, donde el subproducto gas coque es la principal producción, para la mantención de *Waste Heat* se realiza una serie de mantenciones tales como cambio de cordones, empaquetaduras, pues al estar expuestas a altas temperaturas y esfuerzos físicos, se desgastan las juntas aumentando principalmente la infiltración de aire, reportadas en el rendimiento y parámetros registrados.

Existen diversos tipos de mediciones de temperatura, la longitudinal dispuesta de sur a norte considerando solamente *flues* 15,16 de la serie inactiva, la transversal desde lado cerro hacia mar considerando los 30 *flues*, la transversal corta considerando seis *flues* principales; 1,4,15,16,27,30.

La temperatura de la batería se establece de manera longitudinal, se realiza cuatro veces por turno. La forma de medición implica, registrar la temperatura del *flue* inactivo, pues según el sistema de quemado, la mitad de *flues* del muro queman combustible, y la otra mitad esta inactiva. Según esta configuración, la temperatura se debe registrar en diagonal hacia el *flue* inactivo del muro siguiente.

Por tanto, es necesario esperar la alternación de la serie de quemado para completar la toma de temperatura pues por serie se puede registrar la mitad de los datos necesarios, con el valor registrado de temperatura para los *flues* 15, 16 de cada muro desde sur a norte, es posible determinar la temperatura de la batería según el promedio entre las temperaturas registradas. Mediante el desempeño del muro, se determinan acciones, ya sea variando el flujo de combustible o pausa de combustión, siempre buscando operar con la temperatura de meta previamente establecida.

Adicionalmente, se existen dos tomas de temperaturas transversal extra, la transversal donde se registra el desempeño individual del horno, y la transversal corta, consta del registro de seis *flues* claves del muro, entrega una idea general sobre la distribución de temperatura del muro, utilizada principalmente en regiones de la batería de interés específico, ya sea por registros de bajas temperaturas o por algún trabajo en particular sobre los muros tales como soldadura cerámica, entre otros.

La transversal se elabora en base al registro de *flues* inactivos por muro de combustión, realizado desde cerro a mar, la gráfica es la principal herramienta, pues presenta información de interés facilitando la interpretación, de manera que las acciones a realizar en muros de interés se basan según la curva obtenida de temperatura transversal, la Figura 1 representa una gráfica de temperatura transversal.

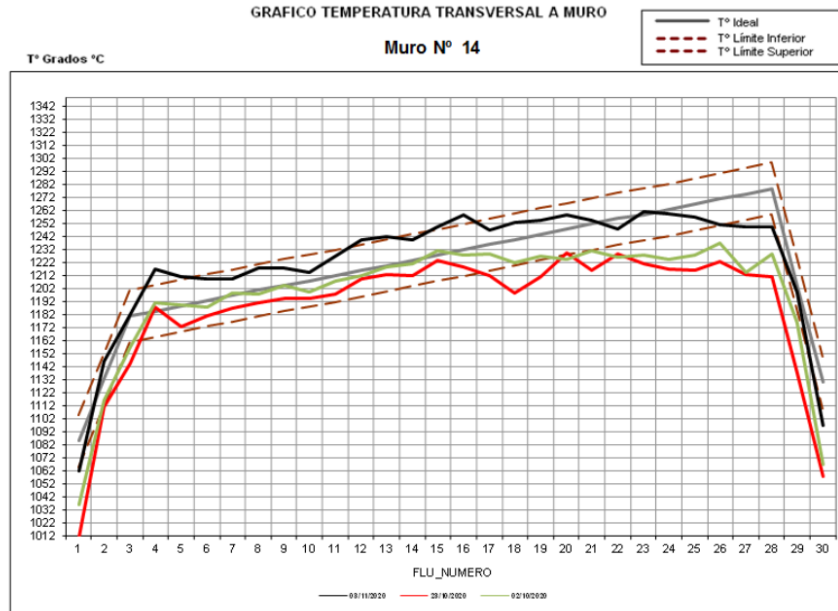


Figura 1. Temperatura transversal de muro. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.

Existen referencias para la curva de temperatura transversal, las cuales indican desempeño óptimo, se identifican; recta de comportamiento ideal con gris, y en punteado aparecen dos rectas, límites superior e inferior para el comportamiento óptimo. Entre estas dos rectas, existe una región donde el desempeño del muro es óptimo para la operación.

Mejoramiento térmico se encarga de analizar muros y priorizar aquellos más afectados, la curva de temperatura transversal condiciona la toma de decisiones, pues el desempeño del muro se analiza de manera gráfica mediante la distribución de temperatura, además identifica los *flues* de menor y mayor temperatura dentro de este.

Condiciones de humedad son influyentes para el proceso, pues al variar entre 10% para la temporada entre, octubre y marzo, alcanzan valores cercanos al 18% de humedad para el resto del año. Incidiendo directamente en la cantidad de energía requerida para alcanzar la temperatura meta de la batería.

Según el *software* PI Processbook, encargado de registrar, interpretar y programar los datos y equipos, reporta producciones de 400 toneladas de coque por turno aproximadamente, con promedio de parámetros CSR 65%, CRI 21%, flujo de gas coque producido cercano a 17 000 Nm<sup>3</sup>/h posteriormente tratado en subproductos.

El índice de energía varía principalmente por la humedad, entre 0.88 Gcal/ton de carbón húmedo, en estaciones del año donde la humedad es cercana al 10%, en estaciones más húmedas, se reportan valores cercanos al 0.98 Gcal/tCH.

Los principales productos sólidos de la batería, coque y el coque fino apagado, tienen continuidad en el proceso pues ambos tipos de coque alimentan el Alto Horno para la producción de arrabio.

Los subproductos tales como, gas mezcla, alquitrán, amoníaco, naftaleno y ácido sulfhídrico, son tratados directamente en la planta de subproductos situada en las cercanías de la planta de coque, donde el alquitrán y amoníaco destacan, el primero en el alto horno como combustible auxiliar y el segundo en la planta coque, utilizado para disminuir la temperatura de gases producto.

## Capítulo 3 Metodología

El proceso es representado mediante dos cajas negras, considerando, el muro de combustión, donde se combustionan los gases para alcanzar la temperatura objetivo, y el horno de coquización donde se lleva a cabo la pirólisis del carbón en ausencia de oxígeno.

Según la configuración de la batería, el calor requerido para el proceso de pirólisis es aportado mediante el contacto de los muros adyacentes por ambos lados del horno de combustión, por tanto, ambos procesos están concadenados, pero ocurren en lugares físicos separados.

Mediante el balance energético de la planta de coque se puede estimar el nivel de eficiencia energética, según la relación entre la energía teórica, y la energía empleada en el proceso, dependiente del combustible empleado para la operación de la planta. A continuación, el siguiente diagrama presenta la distribución completa de la planta de coque.

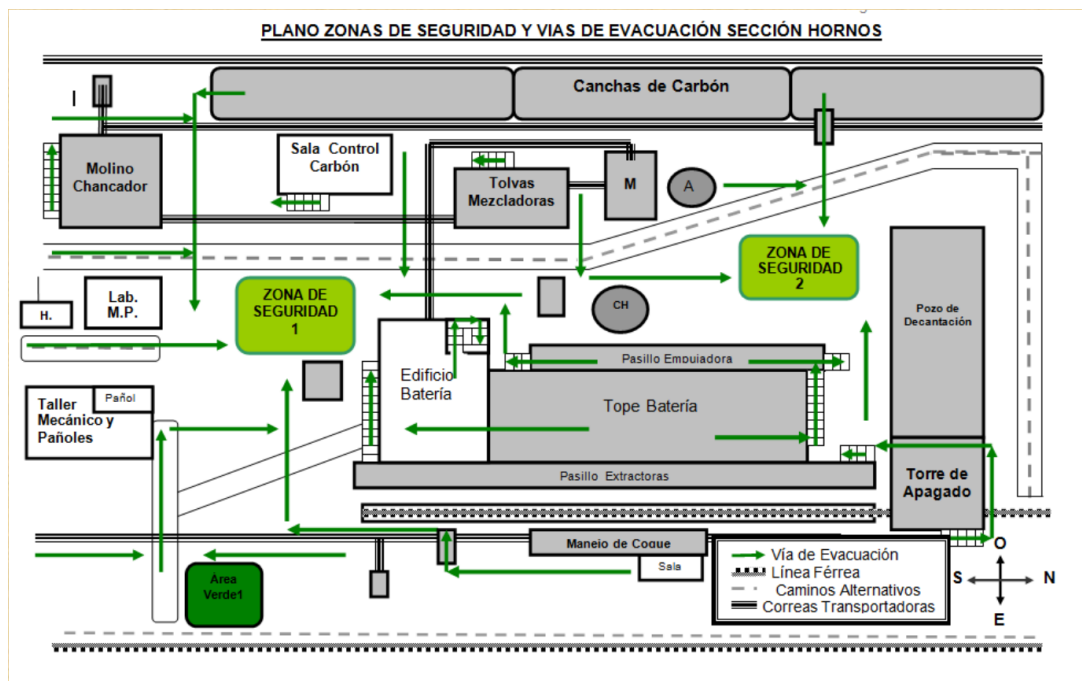
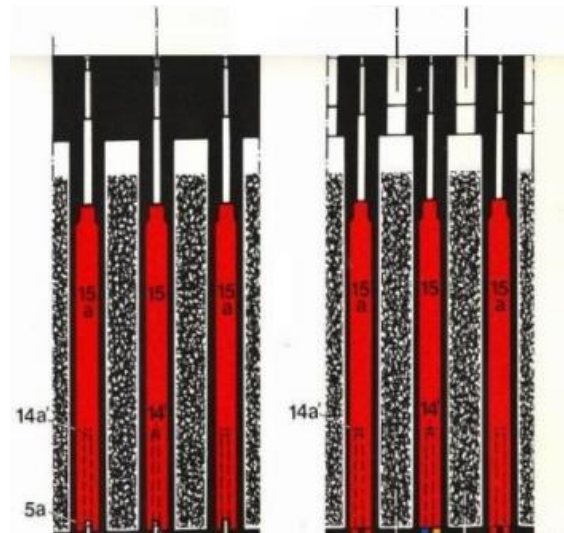


Figura 2. Mapa de sección batería, subproductos, manejo de carbón, CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.

La figura anterior otorga una visión panorámica sobre la planta de coque y alrededores, la batería como unidad es clave en planta de coque, pues se lleva a cabo la producción de coque y subproductos de coque.

La siguiente figura, ilustra la distribución de muros y hornos al interior de la batería, donde los hornos están coloreados, de negro y muros de combustión de color rojo, suministrando el calor necesario para la pirolisis del horno mediante el contacto con ambos muros adyacentes al horno.



*Figura 3. Configuración de Batería CSH, distribución de hornos y muros. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.*

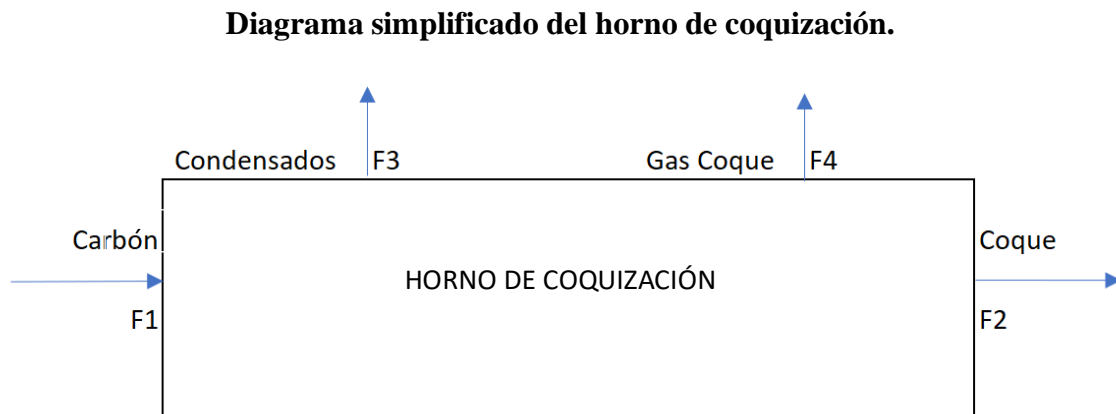
Según la configuración de la batería, es decir distribución de los equipos y características intrínsecas del proceso productivo de coque, es conveniente realizar balances por separados en cada tipo de equipo, es decir balance por muro y por horno, pues cada equipo cuenta con flujos de entrada y salida independientes, justificando la separación de dos cajas negras.

Si bien ambos equipos se disponen en espacios distintos, están vinculados entre sí, pues los muros de combustión, se encarga de suministrar la energía necesaria para la pirólisis de los carbones, mediante la quema de algún gas combustible, la energía es suministrada hacia los hornos de coquización, mediante el contacto entre las paredes, donde el calor avanza desde la orilla hacia el centro de la carga.

El calor generado por los muros de combustión es suministrado por ambas paredes del horno de coquización, lado sur y norte, de esta forma la coquización ocurre desde las paredes hacia el centro de la carga presente en el horno.

El proceso de coquización al ser *batch* se refiere a que la carga luego de cumplir el tiempo de coquización es empujada obteniendo productos como coque, gas coque y condensados principalmente.

A continuación, el siguiente diagrama de bloque en la Figura 4, representa los flujos involucrados en el proceso, si bien la carga de carbones ocurre desde el tope de batería, con fines ilustrativos se presenta por el costado, para ilustrar de forma clara que la única entrada al horno es la mezcla de carbones.



*Figura 4. Diagrama de bloques de horno de coquización, Batería CSH. Fuente: Confección Propia.*

El proceso produce dos tipos de productos, sólidos como el coque y gaseosos siendo el gas coque el principal producto gaseoso, este al abandonar el horno es rociado con licor amoniacal en el stand pipe disminuyendo su temperatura hasta los 200 °C aproximadamente, luego es rociado nuevamente en la colectora descendiendo hasta los 80 °C aproximadamente, para esa temperatura dentro de la colectora se separa el gas de condensados, estos últimos decantan hacia el fondo. Gases con menor temperatura son más seguros y fáciles de transportar hacia la planta de subproductos donde se separa en diversos productos de interés.

La batería está compuesta por 58 hornos, de capacidad volumétrica similar, suponiendo rendimientos similares, y considerando que todos son operados bajo las mismas condiciones de temperatura meta y tiempo de residencia es posible considerar el total de hornos como solo un horno para fines de cálculo y diseño del balance.

Existen contingencias operacionales cuando hay hornos con historial de emisiones ambientales nivel tres, se aumenta levemente el tiempo de residencia en una hora, comparativamente con el tiempo inicial de 19 horas, el tiempo extra impuesto para disminuir emisiones es prácticamente despreciable, estas condiciones permiten considerar el total de hornos como solo un gran horno para fines de diseño y cálculo.

El diseño simplificado del horno considera los siguientes flujos, una entrada F1 mezcla de carbones y tres salidas, F2 coque, F3 gas coque, F4 condensados, mediante relaciones se estiman valores de caudal y composición de cada flujo.

Mediante los diversos softwares instalados en la operación de la planta, se registran varios parámetros de control de la operación, junto con registrar información clave de la materia prima ingresada, tales como humedad, materia volátil, cenizas.

Mediante las relaciones establecidas a continuación, se estiman cálculos preliminares que cuantifican las cantidades de productos esperados, basados en las propiedades de la mezcla además de la cantidad cargada para el proceso.

La mezcla de carbones cuenta con humedad, debido a condiciones de almacenamiento, para efecto de cálculos, correlaciones y tratamiento de la información se considera base seca, es decir, se descuenta la masa de humedad, por tanto, la cantidad de materia efectiva para el proceso de coquización considera base seca de carbones, la cual descuenta la humedad de la mezcla.

$$\text{Masa de Carbón Seco} = \text{Masa de Carbón Húmedo} * (1 - \% \text{Humedad de Carbones})$$

Durante la pirolisis de los carbones, la masa ingresada al horno se conserva, transformándose en coque y gas coque crudo principalmente, por lo tanto, conociendo los volúmenes de entrada, salida y considerando el proceso presente en el reactor, se establecen relaciones válidas para el balance [9].

En el balance de materia dentro de los muros de combustión, debido a su configuración y diseño existen menos incógnitas desde un principio, mediante la Figura 5 es posible evidenciar entradas y salidas presentes en la unidad de combustión.

#### Diagrama simplificado del muro de combustión

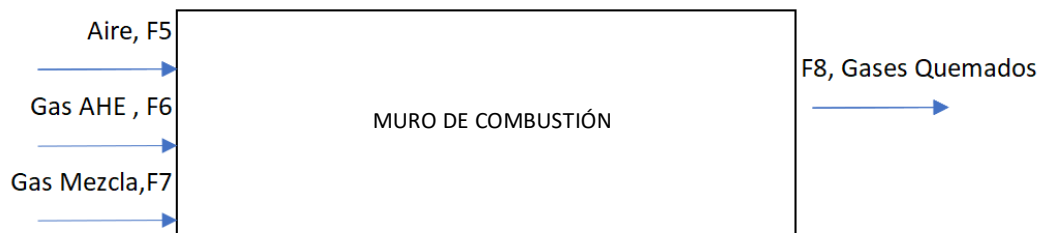


Figura 5. Diagrama de bloque del Muro de Combustión, Batería CSH. Fuente: Confección Propia.

En la configuración del equipo se evidencian tres entradas, sin embargo, se consideran dos pues, la operación del muro consta de la combustión de aire F5, junto algún combustible que puede ser GAHE F6 o Gas Mezcla F7, y una salida denominada gases quemados F8. La selección del combustible responde a las condiciones operacionales, donde GAHE es el combustible por defecto.

Cada muro de combustión tiene asociada una unidad de succión de gases de combustión *Waste Heat* encargada de evacuar los gases quemados provenientes de los 59 muros hacia la chimenea, la temperatura de estos gases de combustión es de 200 °C aproximadamente.

La principal diferencia entre los gases de combustión y los gases de producción corresponde a la recepción de estos pues los primeros son evacuados por la chimenea hacia el ambiente y los de producción son acopiados y transportados hacia la unidad de subproductos donde se separa principalmente en cinco productos utilizados en la operación de la planta en general, ácido sulfhídrico, amoníaco, alquitrán, naftaleno, gas mezcla.

La información reportada para el muro corresponde a flujo de combustible instantáneo, %O<sub>2</sub> en gases quemados y %CO cercano al 1%, basado en la evidencia operacional, se asume una evolución completa de CO a CO<sub>2</sub> para los productos. A continuación, la tabla presenta la composición típica del GAHE por especie.

*Tabla 1. Composición típica de GAHE, utilizado en CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.*

<b>Especie</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
H <sub>2</sub>	5.6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.4
CH <sub>4</sub>	3.3
CO	23.4
CO <sub>2</sub>	21
N <sub>2</sub>	32.2
O <sub>2</sub>	5.5
H <sub>2</sub> O	8.6

Los cálculos teóricos de combustión permiten trabajar con menor cantidad de incógnitas en un principio, al tratarse de una combustión completa no reporta oxígeno en los gases quemados.

A continuación, la siguiente tabla muestra la composición típica de gases quemados teóricos para Flujo de GAHE de 52 000 Nm<sup>3</sup>/h y Poder Calorífico (PC) de 1000 kcal/m<sup>3</sup>. La composición y flujo de gases quemados es obtenida con base en las reacciones ocurridas dentro de la batería, pues según estas reacciones es determinada la cantidad formada junto a la concentración de cada especie.

*Tabla 2. Composición de gases quemados para un flujo de aire estequiométrico, GAHE. Fuente: Confección Propia.*

<b>Especie</b>	<b>Flujo Nm<sup>3</sup>/h</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
CO <sub>2</sub>	25 171	30.4
N <sub>2</sub>	47 170	57.0
O <sub>2</sub>	0	0
H <sub>2</sub> O	10 459	12.6
<b>F8</b>	<b>82 800</b>	<b>100</b>

La disponibilidad de aire comparado con el gas es mucho mayor, los componentes del gas combustible son los reactivos limitantes de cada reacción presentada en la Tabla 3, donde la formación de especies tales como dióxido de carbono y vapor de agua están condicionadas por la cantidad de reactivos provenientes del combustible. Por lo tanto, exceso de aire no provoca un aumento de producción para ambas especies mencionadas, en cambio sí aumenta la presencia de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en los productos, incidiendo directamente sobre el balance energético.

Tabla 3. Principales reacciones en muros de combustión, batería CSH. Fuente: Confección Propia

Reacción	$\Delta H$ (kcal/kmol)
$H_2 + 0.5 O_2 = H_2O$	-57 798
$CO + 0.5 O_2 = CO_2$	-67 630
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$	-191 816
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$	-316 220

Estas cuatro reacciones son las principales de combustión, pues existen otras para el resto de los hidrocarburos presentes en el combustible, pero al presentar concentraciones bajas en la mezcla del orden de ppm, resultan despreciables en comparación a las reacciones de las principales especies del combustible como el hidrógeno, metano, etileno.

El lugar físico donde ocurre la combustión es el regenerador de calor, donde el aire ingresa a temperatura ambiente, pero se precalienta de camino a la cámara de combustión, mediante el contacto de *flues*, pues el diseño provoca que al cruzarse con los gases quemados aumenta la temperatura del aire entrante. Para efectos de cálculo se considera la temperatura ambiente como la temperatura inicial del flujo de aire F5 indicado en la Figura 5. Por su parte, la temperatura de ingreso para el combustible está registrada en el software PI.

A su vez, el flujo de aire requerido para las reacciones está relacionado con el tipo de combustible a utilizar ya sea GAHE o GM, pues varía la concentración de especies metano, hidrógeno, etileno, monóxido y dióxido de carbono en otras de cada gas, a partir de la composición del combustible y su flujo es posible determinar el flujo de oxígeno requerido teóricamente para la combustión, según las reacciones de la Tabla 3.

El flujo de aire teórico para la combustión se estima mediante la suma de moles de oxígeno requerido para cada combustión, las reacciones establecen la relación entre moles de reactantes y moles de oxígeno requerido, asumiendo comportamiento ideal se determina el flujo.

Al asumir comportamiento ideal para gases, es posible convertir flujos volumétricos en moles según el factor de conversión 22.4 L/mol o m<sup>3</sup>/kmol, por tanto, al tratar el flujo del combustible por especie, mediante el factor reporta el número de moles involucrados en cada flujo.

La diferencia entre la suma de moles de O<sub>2</sub> requeridos según la reacción menos la cantidad de O<sub>2</sub> aportados por el combustible, estima la cantidad de moles de O<sub>2</sub> requeridos para combustionar el gas.

Según la cantidad de moles y la proporción fija de O<sub>2</sub> en el aire, establecida como el 21%, y el factor de conversión de gas ideal, se estima el flujo de aire requerido para la combustión teórica, tal volumen combustiona la totalidad del combustible involucrado.

Sin embargo, la ejecución del proceso considera volúmenes de aire mayores a lo requerido, con el fin de asegurar combustión completa, el análisis de gases quemados es clave para determinar la cantidad de aire ingresado a la batería el cual considera teórico junto al exceso de aire.

Como la combustión completa implica nula presencia de O<sub>2</sub> en gases quemados, reportes del valor porcentual en gases quemados, relaciona directamente al flujo de aire adicional ingresado utilizado para calentamiento de la batería.

El oxígeno se comporta como reactivo en exceso, es decir, volúmenes adicionales de aire solo afectan flujos de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en gases quemados, especies como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O no variaría según exceso, la siguiente relación representa el comportamiento entre el porcentaje de oxígeno en gases quemados y el flujo de gases quemados, ambos datos registrados en la operación.

$$\%O_{2\text{Gases quemados}} = \frac{\text{Flujo de } O_2}{\text{Flujo Gases quemados}} \times 100\%$$

El flujo de aire ingresado a la combustión se puede expresar en función del %O<sub>2</sub> de gases quemados, y el flujo de oxígeno previamente estimado de la siguiente forma,

$$\text{Flujo Aire} = \frac{\text{Flujo de } O_2}{\%O_2}$$

Al considerar la composición del aire como 21% oxígeno y el resto de nitrógeno, la siguiente relación estima el flujo de nitrógeno.

$$\text{Flujo de } N_2 = \frac{79}{21} \text{Flujo de } O_2$$

La siguiente expresión, identifica la relación entre flujos.

$$\text{Flujo gas quemado} = \text{Flujo gas quemado}_{teo} + \text{Flujo exceso de aire}$$

Por lo tanto, mediante el flujo teórico de gases quemados y %O<sub>2</sub> de gases quemados es posible estimar el flujo de oxígeno, flujo de aire ingresado y flujo total de gas quemado mediante la suma del teórico y aire ingresado

Luego del balance másico para el muro de combustión, procede el horno de combustión, donde el principal proceso fisicoquímico presente al interior es la pirólisis de la mezcla de carbones en ausencia de oxígeno para obtener coque. Debido a la naturaleza del proceso es necesario el calentamiento de muros como unidad auxiliar para suministrar el calor requerido para el proceso ocurrido en el horno.

Según la Figura 4, el proceso ocurrido en el horno consta de una entrada hacia el horno, la cual considera la alimentación con la mezcla de carbones desde la parte superior, y considera tres salidas, una sólida coque como producto principal y otra gaseosa, gas coque acompañado de condensados.

Cada horno de coquización cuenta con su unidad independiente para el tratamiento de gases producto de pirólisis el cual considera gas coque y condensados, los cuales abandonan el horno a una temperatura aproximada de 800 °C, al momento de ingresar al Stand Pipe unidad encargada de recibir estos gases.

El gas se rocía con licor amoniacal para reducir la temperatura en primera instancia, hasta 200 °C, todos los stand pipe se conectan a la colectora de gases donde se rocía nuevamente licor

alcanzando temperatura de 80 °C aproximadamente, para esta temperatura ocurre la separación entre el gas coque y condensados.

La mezcla de carbones entrega información clave para el proceso y útil para el balance másico dentro del horno, tales como humedad de la mezcla, materia volátil y cenizas presente en la mezcla de carbones, mediante esta información se estima masa de coque, masa de gases relacionado a la carga de mezcla de carbones.

El reporte de ingreso de masa de carbones es realizado en base húmeda, es decir considerando la humedad de la mezcla, para el tratamiento de información es necesario descontar la humedad para trabajar con base seca, por tanto, esta diferencia entre masa cargada y base seca corresponde a vapor de agua.

$$Masa\ Carbon_{seco} = Masa\ Carbon_{cargado} * (100\% - \%Humedad_{carbones})$$

Según la relación anterior se define la base seca de operación utilizada para cálculos y relaciones, la materia volátil de carbones y coque es relacionada directamente con la masa del coque obtenida, ambos valores de materia volátil son registrados en el software de control, la diferencia entre materia volátil es clave para estimar la cantidad de coque esperada según la masa cargada, el proceso de pirólisis ocurrido en el horno de coquización, libera la materia volátil del carbón durante el periodo de coquización, mediante la siguiente relación se estima la masa de coque.

$$Masa\ Coque = Masa\ Carbon_{seco} * (1 - (MV_{carbón} - MV_{coque}))$$

El factor que multiplica la masa de carbón seco se denomina rendimiento carbón coque, el cual indica la cantidad de carbón que se puede coquizar, con respecto a las materias volátiles de carbones y coque, factor importante en operación pues en base a la relación se pronostican resultados de producción, lo cual se utiliza para establecer mínimos de operación KPI, indicador de producción clave, establece rangos de operación objetivos para el desarrollo del proceso, producción y gerencia.

El lugar físico donde ocurren la coquización cuenta con una salida para gases, según la ley de conservación de la materia, la diferencia entre la masa de carbones cargados y la masa de coque

necesariamente es la masa de gas total que abandona el horno. Mediante tal relación se estima en primera instancia la masa de gases evacuados desde el horno.

$$Masa\ Gas\ Salida = Masa\ Carbón_{base\ seca} - Masa\ Coque$$

Desde la relación anterior se estima la cantidad total de gas producido en el horno según la masa de carbón y rendimiento carbón/coque incluido en el cálculo para masa de coque, al ser la masa total del gas, mediante la relación entre masa total de gas y la masa de gas coque, para determinar la masa de esta última.

Por medio de las reacciones de pirólisis presentes en el reactor, se estima la masa de coque producida, debido a la complejidad física para determinar la totalidad de reacciones que se llevan a cabo en la coquización misma de este proceso, establecer relaciones operacionales permite estimar de manera acertada la cantidad de masa perteneciente a gas coque durante la coquización.

A partir de los datos históricos, es posible obtener una relación para el cálculo de la masa de condensados. Al analizar los datos históricos manejados por el equipo de operación de la planta se establecen relaciones de operación útiles para el estimar la cantidad de subproductos producidos según tonelada de carbón cargado en base seca, tales subproductos como alquitrán, amoníaco y ácido sulfhídrico componen principalmente los condensados con tasas de producción correspondientes a 29.6 kg/tcs, 17.2 kg/tcs, 2.5 kg/tcs, referido para periodos mayores a 1 año donde se visualiza estabilidad en el valor del parámetro.

Luego para obtener la masa de subproductos presente en el gas coque, como condensados, se multiplica entre el factor establecido por operación, base seca de carbón cargado y la densidad correspondiente. Para el caso del alquitrán es  $1\ 140\ \text{kg/m}^3$  y a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Masa alquitrán} = \text{Masa carbón}_{\text{base seca}} * 29.6 \frac{\text{kg}}{t_{\text{masa cargada}}}$$

La diferencia entre la masa de coque, masa de condensados, masa cargada de carbón en base seca, y vapor de agua proveniente de la humedad en mezcla de carbones, indica la producción másica de gas coque, donde la densidad de este gas presenta un valor de  $0.41\ \text{kg/m}^3$  factor utilizado para determinar flujo volumétrico de gas coque.

En la colectora de gases ocurre la separación entre fases, líquida y gaseosa, donde condensados correspondientes a fase líquida se depositan en la base, por su parte el gas coque es aspirado hacia subproductos para su posterior tratamiento.

La siguiente figura, representa el stand pipe y la colectora de gases, el gas coque abandona el horno de coquización, a través del stand pipe donde se rocía de licor amoniacal desde el extremo superior en primera instancia para enfriar el gas, luego un segundo rociado, separa fases líquida de gaseosa, los condensados decantan al fondo de la colectora y el gas es aspirado hacia subproductos.

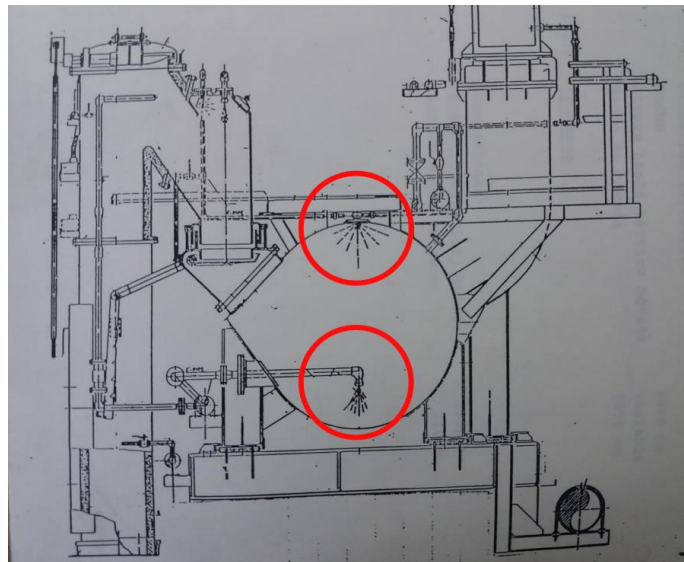


Figura 6. Planos de Stand Pipe, colectora de gases de CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.

Por medio de las relaciones y balances anteriores se estima el flujo de aire necesario para combustión según %O<sub>2</sub> reportado en gases quemados y flujo de gas coque crudo es decir gas recién producido del horno conteniendo impurezas mencionadas previamente, ritmo de producido según la cantidad cargada de carbones.

De manera similar se realiza el balance de energía para cada unidad, pues la base para el balance es similar mediante el principio de conservación de la energía [9].

La cantidad de energía introducida a la batería es utilizada en el proceso de pirólisis. Además, hay cantidades de energía desperdiciadas las cuales consideran emanación de los gases de combustión y energías disipadas por los equipos.

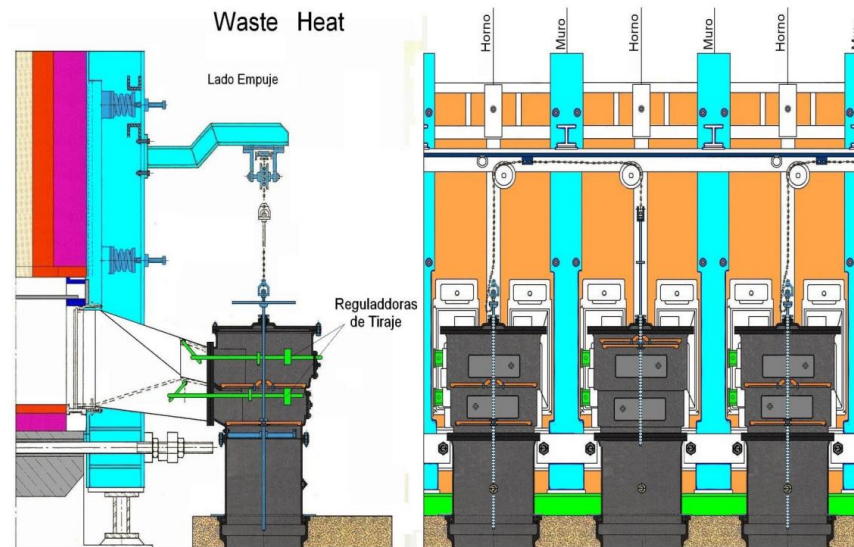
El principal objetivo del balance energético es determinar la cantidad de energía necesaria para el proceso según la utilizada efectivamente en este, junto al desglose energético por especie de los flujos y posibles sobreconsumos en algún proceso, debido a la antigüedad de la batería, se esperan pérdidas energéticas debido al uso de la batería.

La forma más conveniente de llevar a cabo el balance global de energía es comenzar por el muro de combustión, pues la cantidad de energía utilizable en el horno de combustión proviene del muro. Si bien la batería está compuesta por 58 hornos y 59 muros, en términos de diseño cada horno está acompañado por un muro a cada lado.

Para el planteamiento del balance de calor, se establece la condición de que un muro alimenta de energía un horno, pues geoméricamente la distribución de la batería indica que cada muro alimenta dos hornos por lado norte y sur. Técnicamente la mitad de un muro alimenta un horno por un lado y por el lado opuesto la mitad del muro siguiente, es decir, dos medios muros de combustión alimentan energéticamente un horno, además de considerar rendimiento térmico similar en los muros, por lo tanto, según la distribución y geometría presente es posible establecer la condición para el balance energético de 1:1, o bien, un muro entero alimenta un horno.

Además, es necesario considerar que el funcionamiento de los equipos de succión de gases combustión *waste heat* funcionan y operan de manera similar entre ellos, es decir un *waste heat* se encarga de dos muros. La lógica para la disposición en el balance es la misma, es decir 1:1:1, un *waste heat* por un muro por un horno.

La Figura 7, representa la operación del grupo de *waste heat*, las cuales se encuentran conectadas según la serie de quemado, es decir, para la serie roja están quemando las impares, y las pares evacuan gases y viceversa, en condición de quemado el vástago se encuentra abajo, cerrando ambos platillos, para el caso de evacuar el vástago está arriba.



*Figura 7. Representación gráfica de waste heat, distribución y operación de CSH. Fuente: Compañía Siderúrgica Huachipato.*

Mediante el balance energético del muro de combustión se puede estimar la energía disponible de la unidad, mediante la diferencia entre aportes y consumos energéticos, consumos asociados a la temperatura con la que abandonan los gases quemados y pérdidas asociadas a la operación de la unidad.

La principal fuente de energía proviene del calor generado por las reacciones de combustión dentro de los muros. Además, se consideran aportes energéticos relacionados a la variación de temperatura del combustible, pues ingresa con una temperatura superior a la temperatura de referencia impuesta, considerado como aporte energético pues la reacción ya sucede a una temperatura inferior, por tanto, la diferencia de temperatura considera una energía extra aportada al sistema. Por consiguiente, el balance en el muro considera aportes energéticos provenientes de reacciones de combustión y energía proveniente del combustible precalentado. A su vez, el proceso de coquización es considerado a presión constante para efectos de cálculo y diseño, si bien en operación ocurren variaciones de presión, son prácticamente despreciables, alrededor de 1 o 2 mmca. Identificadas las

principales reacciones involucradas en la combustión, el cálculo de energía procede entre la cantidad de materia involucrada y su capacidad calorífica  $C_p$ .

El calor aportado por la diferencia de temperatura entre la temperatura de ingreso del gas combustible y la temperatura de referencia, definida como la temperatura ambiente a la cual ingresa el aire a los regeneradores, está definido por la multiplicación entre la capacidad calorífica, cantidad de materia y diferencia de temperatura según la siguiente ecuación.

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

De esta forma, el total de energía involucrada en la reacción del muro de combustión está determinada por la sumatoria de la energía aportada por cada reacción ocurrida en la combustión, añadir la energía aportada por el combustible precalentado, representaría el total de calor aportado por el muro.

$$Q = \sum Q_i$$

Dentro de los consumos energéticos se considera el calor involucrado al evacuar los gases quemados del muro pues la temperatura con la que evacuan los gases quemados es de aproximadamente 200 °C. Según la composición de los gases quemados proveniente del balance másico para el muro de combustión, es posible estimar el calor involucrado en este flujo, pues al estar prácticamente compuesto de cuatro especies  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  y  $N_2$  a través de sus capacidades caloríficas, cantidad de materia, ya sea mol o masa, y diferencia de temperatura, entre la temperatura de salida y la de referencia, fue estimado el total de calor involucrado, procede de la suma del calor por especie.

Estimada la cantidad de calor arrastrada por los gases quemados e identificados los aportes caloríficos en el reactor, se estimó la cantidad de calor aportado al muro según la diferencia entre el calor aportado y el consumo de energía proveniente de gases quemados. Por lo tanto, una vez estimada la cantidad de calor involucrado y su relación con el proceso, ya sea aporte o consumo, se determina la cantidad de calor aportada hacia al horno de combustión.

$$Q_{muro} = Q_{GAHE_{sensible}} + Q_{rxs_{combustión}} - Q_{Gas\ Quemado_{sensible}} - Q_{pérdidas}$$

Para el horno de coquización es necesario identificar las energías presentes y cómo afectan al proceso ocurrido al interior, el aporte calorífico al horno consta principalmente del calor proveniente de los muros de combustión donde se quema el combustible suministrando el calor para el proceso mediante el contacto de superficies calientes logrando la distribución de calor a través de las paredes del horno.

El proceso de coquización avanza desde las paredes hacia el centro de la carga, por lo tanto, el calor proveniente de los muros es el principal responsable del proceso. Los consumos energéticos del horno de coquización consideran, calor sensible del gas coque el cual abandona la unidad a 700 °C aproximadamente, calor necesario para la coquización, según el balance energético se obtiene una expresión la cual relaciona la energía de coquización mediante la siguiente relación.

$$Q_{coquizacion} = Q_{muro} - Q_{Gas\ Coque\ sensible} - Q_{coque} - Q_{pérdidas}$$

Mediante la relación anterior se estima la cantidad de calor involucrada o disponible para el proceso de coquización, el calor estimado corresponde a la cantidad de energía mínima para el proceso de coquización. Sin embargo, el proceso es operado en exceso de energía para asegurar el correcto funcionamiento y cubrir imprevistos o contingencias operacionales, sobre todo infiltraciones de aire las cuales están presentes a lo largo de todo el proceso, la manera de verificar el exceso del aire es mediante el porcentaje de oxígeno presente en gases quemados, según lo mencionado.

Establecidas las relaciones de energía necesaria para el proceso, se compara con la cantidad real de energía ingresada a la batería, reportada en los parámetros de operación, al comparar este valor con respecto al teórico, se evidencian leves variaciones en los valores, lo cual se justifica en el estado de la batería.

Para determinar el flujo de energía ingresada al reactor, se considera flujo de combustible quemado, poder calorífico asociado, y cuánto tiempo fue suministrado el flujo de combustible. La correcta elección del flujo es vital para preservar la temperatura meta de batería minimizando desgastes.

Para estimar el cálculo, se considera que el flujo de operación impuesto, denominado flujo instantáneo, está relacionado con la cantidad de materia suministrada instantáneamente, sin considerar los tiempos de neutro intrínsecos presentes en cada alternación, además de aquel programado como control de temperatura. Sin embargo, existen relaciones para el cálculo efectivo de la energía suministrada según los parámetros de operación, donde el tiempo efectivo de quemado es clave para las relaciones y cálculos.

El tiempo efectivo de quemado puede variar durante la operación, existe un tiempo muerto fijo ( $t_m$ ) el cual considera alternaciones, alarmas y espera, la variación existe en la pausa, pues es una variable de control manipulable, afectando directamente el flujo de combustible quemado y por consiguiente la energía involucrada, la siguiente relación representa el tiempo efectivo de quemado por hora.

$$\text{tiempo efectivo quemado} = \frac{3600 - (\text{pausa} + t_m)}{3600}$$

Relacionado al tiempo efectivo de quemado, se define el consumo efectivo de gas combustible, el cual considera la multiplicación entre el factor de tiempo efectivo y flujo instantáneo de gas, referida por la cantidad de tiempo considerada en el flujo instantáneo.

$$\text{Consumo efectivo de gas} = \text{Flujo instantáneo} * \text{tiempo efectivo quemado}$$

El sistema de control permite fijar parámetros de operación, siempre con respecto al consumo instantáneo, por ejemplo, poder calorífico del GAHE y flujo de GAHE entre otros. Para efectos de cálculo reales es necesario utilizar relaciones que consideren el tiempo de neutro presente en la batería, tales como las definidas con anterioridad.

En consiguiente, según las relaciones anteriores es posible calcular el consumo energético efectivo, pues al estimar la cantidad de flujo efectivo de gas y relacionarlo con su poder calorífico, se obtiene dicho dato, a través de la siguiente relación:

$$\textit{consumo energético efectivo} = \textit{consumo efectivo gas} * \textit{poder calorífico gas}$$

## Capítulo 4 Resultados y Discusiones

A través de las consideraciones y condiciones establecidas previamente son realizados cálculos según lo estipulado, al manejar la información en planillas de cálculo Excel®, considerando distintos periodos de tiempo con distintos niveles de producción con el fin de comparar y obtener conclusiones de los resultados.

La temperatura de referencia la cual implica que a cierta temperatura impuesta todas las reacciones ocurren en su totalidad, válido para el cálculo del balance energético, la experiencia descrita considera que para el balance de la batería la temperatura ambiente es la de referencia, fijada en 25 °C.

El reporte volumétrico de gases considera Nm<sup>3</sup>, considera un volumen de gas en condiciones normales, es decir, 25 °C, al tratarse de 5 °C, la diferencia de temperaturas es acertado tratar los volúmenes directamente en m<sup>3</sup>. En estricto rigor lo que varía es el volumen del gas, conservando la cantidad de materia presente en el gas, para estos efectos esta variación se considera nula.

Si bien se realizan cálculos para la operación con GM y GAHE, debido a la falta de información, tiempo de operación con GM, pues su uso responde a contingencias operacionales donde el suministro de GAHE se encuentra limitado ya sea por fallas de AAHH o alguna otra situación puntal. Además, el combustible principal para la operación de la batería es GAHE, se considera principalmente resultados de operación con GAHE, pues es el combustible por defecto de operación.

El alcance práctico de este trabajo considera la simulación de condiciones para cuatro periodos clave durante los últimos 14 meses en Huachipato, pues durante este periodo se observan variaciones en la producción ya sea por condiciones actuales de la batería o por decisiones impuestas desde el directorio justificadas en disminuir el costo de producción del arrabio.

Desde operación se identifican variables clave, tales como cantidad de carbón cargado relacionado directamente con el ritmo de empuje, humedad mezcla de carbones, poder calorífico de los gases combustible, %O<sub>2</sub> en gases quemados.

Tales variables serán comparadas según el ritmo de empuje diario, determinado desde el directorio organizacional, por tanto, el principal punto de distinción para distintos periodos de operación es el ritmo de empuje.

Para el desarrollo de este proyecto se considera una base de cálculo comprendida entre el 1 de enero del 2023, hasta el 25 de febrero de 2024, comprendiendo un periodo superior a 400 días de operación continua, donde destacan cuatro periodos de interés para desarrollo y posterior análisis.

Cada periodo diferenciado principalmente por el ritmo de empuje establecido según directorio, puesto que la empresa depende transversalmente de las directrices del directorio, se prevé una disminución progresiva de la producción de coque, estableciendo el objetivo de reducir la producción por niveles inferiores a los consumos del principal cliente de Planta de Coque, Altos Hornos de Huachipato, aprovechando el gran stock de coque presente en la compañía.

El primer periodo comprende las fechas desde el primero de enero del 2023, hasta el 27 de marzo del mismo año, ambas fechas inclusive, donde las principales variables de operación indican un ritmo de empuje establecido en 69 hornos empujados al día, es decir una carga diaria aproximada de 1500 toneladas en base húmeda de carbones, con una humedad del 10.3%, además de un rendimiento carbón/coque del 73.6% relacionado directamente con las materias volátiles presentes tanto en coque y carbones.

A su vez, el flujo realmente empleado de combustible durante este periodo proviene de un levantamiento de información realizado con el software operacional PI System, el cual registra gran cantidad de variables por segundo, la información proveniente corresponde al consumo diario de gas, pero el desarrollo consta del flujo por hora para el muro.

Por tanto, es necesario acomodar la información, a diferencia del valor nominal establecido en control, el registro del PI, considera pausas y tiempos neutros donde no se quema combustible, por tanto, corresponde al valor realmente empleado para la operación.

La principal justificación para utilizar distintas bases de cálculo para el balance de masa en horno y muro surge desde las características intrínsecas de cada proceso ocurrido dentro de cada reactor, pues la coquización es un proceso batch, en cambio la combustión es continua.

Al interpretar resultados del horno es más claro referenciarlos por día de producción, considerando que el tiempo de coquización para cada horno fluctúa alrededor de 19 horas, la base de cálculo diaria es más acertada para la interpretación. En cambio, para los muros de combustión sí es conveniente interpretar los flujos por hora pues la programación y operación de este tipo de reactores referencia sus parámetros por hora.

El combustible suministrado corresponde a 48500 Nm<sup>3</sup>/h aproximado, además los valores de poder calorífico, necesarios para establecer la proporción de gases en la mezcla del GAHE, con valores registrados de 1086 kcal/m<sup>3</sup> para GAHE, en caso del GM 4841 kcal/m<sup>3</sup> y %O<sub>2</sub> en gases quemados registrado de 7.7% para el periodo. La Tabla 4, presenta las principales variables de operación comprendidas en el primer periodo analizado, comprendido entre el 01/01/2023 al 27/03/2023.

*Tabla 4. Condiciones operacionales del periodo 1 entre 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.*

<b>Variable Operacional</b>	<b>Valor Registrado</b>
Ritmo de Empuje	69 Hornos /Día
Carga promedio Carbones	1 547 t
Humedad Mezcla de Carbones	10.3 %
Rendimiento Carbón/Coque	73.6 %
Flujo real de combustible suministrado	48 543 Nm <sup>3</sup> /h
Poder Calorífico GAHE	1 086 kcal/m <sup>3</sup>
Poder Calorífico GM	4 841 kcal/m <sup>3</sup>
% O <sub>2</sub> en Gases Quemados	7.74 %

Según la metodología establecida, se pueden calcular los flujos involucrados en la batería, en muros de combustión y hornos de coquización, para desarrollar balances másicos y energéticos en ambos reactores. Donde la Tabla 5, presenta el balance de masa para muro y hornos a continuación.

Tabla 5. Balance másico para batería de CSH, en el periodo 1. Fuente: Confección Propia.

<b>Balance Másico Batería</b>		<b>Valor Registrado</b>
Balance en Muro		Nm <sup>3</sup> /h
Entradas	Flujo Combustible	48 543
	Flujo Aire	90 507
Salida	Flujo Gases Quemados	131 924
Balance en Horno		kg/día
Entrada	Mezcla de Carbones	1 546 724
Salidas	Masa Coque	1 020 765
	Masa Gases	525 959

Para verificar la efectividad del balance másico, se compara la producción calculada de coque con la producción registrada en el software, con una variación casi nula alrededor de 0.5 kg, además la variación entre entradas y salidas para muros corresponde a 2.6 % para este periodo, valor bastante acertado considerando los volúmenes de trabajo. La masa de gases producidos por el horno es desglosada mediante las relaciones establecidas en metodología, el flujo de gas se compone de la siguiente manera registrada en la Tabla 6.

Tabla 6. Desglose de gases producidos por el Horno de Coquización de CSH, periodo 1. Fuente: Confección Propia.

<b>Gases Producto Horno Coquización</b>	<b>Masa kg/día</b>
Masa Gases	525 959
Masa Gas de Coque	298 551
Masa Vapor de Agua	158 896
Masa Alquitrán	41 135
Masa Amoníaco	23 879
Masa Ácido Sulfhídrico	3 498

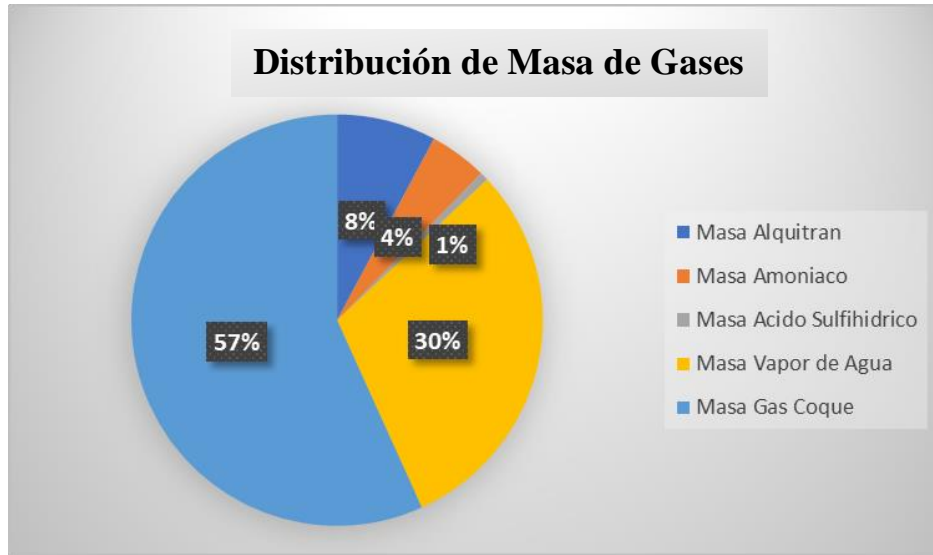
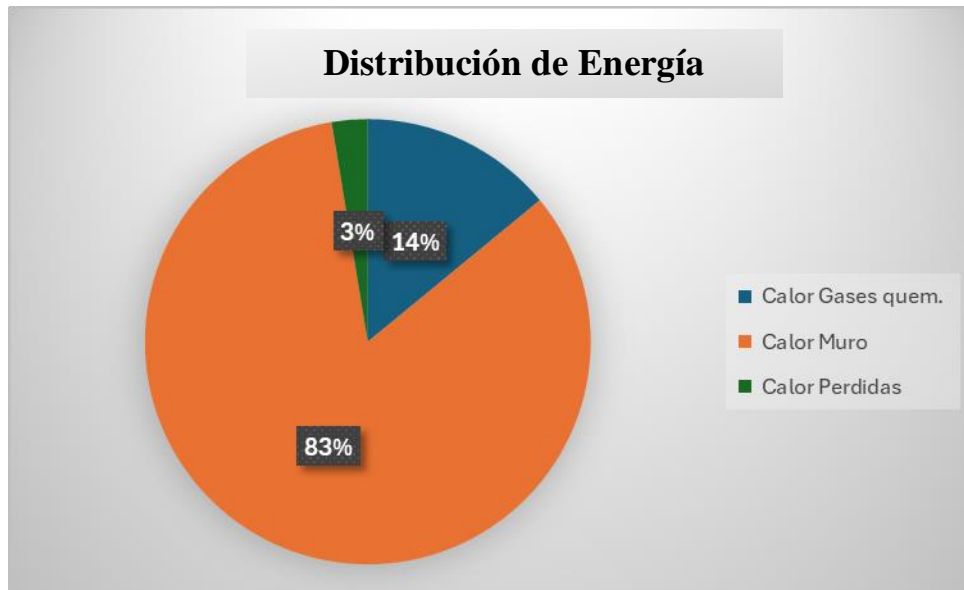


Figura 8. Distribución de la masa de gases en el horno de coquización en CSH, periodo 1.  
Fuente: Confección Propia.

Se procede con el balance energético según la metodología. La energía involucrada en el muro suministra la energía necesaria para el horno y pirólisis de la mezcla de carbones. A continuación, la Tabla 7, presenta el balance energético del muro de combustión.

Tabla 7. Balance energético de muro combustión en CSH. periodo 1,  
Fuente: Confección Propia.

Balance Energético del Muro de Combustión		Energía Gcal/h
Aportes	Calor Proveniente Reacciones	60.36
	Calor Sensible GAHE	0.16
	Total	60.53
Consumos	Calor Sensible en Gases Quemados	8.50
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Proveniente de Muros	50.45
	Total	60.53



*Figura 9. Distribución de energía consumida en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 1.  
Fuente: Confección Propia.*

Mediante el análisis de información, se identifica un periodo de 72 horas, donde la batería no empujó hornos, es decir no hubo producción de coque y subproductos, debido a contingencias operacionales registradas durante el 31 de marzo al 2 de abril del 2023, donde el calentamiento de la batería estuvo dedicado a compensar pérdidas energéticas operacionales ya sean irradiaciones térmicas, pérdidas por superficies calientes o filtraciones en los reactores.

Donde se calcula un valor de 3.15 Gcal/h empleados para compensar la pérdida energética, debido a que corresponde al valor asociado a la operación conjunta de ambas unidades, para cada unidad corresponde la mitad, donde el valor representa un 6% de la energía producida según el cálculo, se considera una aproximación bastante acertada, ya que pérdidas operacionales rondan valores del 5% al 10% de la energía consumida. Cálculos incluidos en Anexo.

Por su parte el calor involucrado en las reacciones presentes se calcula según las reacciones involucradas, cantidad de moles y entalpia estándar involucrada, como en el resto del desarrollo la temperatura de referencia es de 25 °C, temperatura estándar donde se impone la condición de que las reacciones ocurren en su totalidad a esa temperatura. A continuación, la Tabla 8, presenta la energía involucrada por reacción junto con la energía total, para el primer periodo.

Tabla 8. Calor involucrado en las reacciones de combustión del muro, en periodo 1 en CSH. Fuente: Confección Propia.

Reacción	$\Delta H$ (kcal/kmol)	Moles	Energía Gcal/h	%Energía
$H_2 + 0.5 O_2 = H_2O$	-57 798	122.4	7.76	12.9%
$CO + 0.5 O_2 = CO_2$	-67 630	506.6	33.95	56.2%
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$	-191 816	72.4	15.70	26.0%
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$	-316 220	8.3	2.96	4.9%
		<b>Total</b>	<b>60.63</b>	<b>100%</b>

A su vez, cálculos correspondientes a energía sensible de gases ya sean de combustible o gases quemados serán incluidos en el anexo del documento con el fin de presentar la información de forma más compacta, por lo tanto, realizada la estimación del calor aportado desde el muro hacia el horno para el proceso de coquización, se procede al balance energético para el horno de coquización, el cual se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Balance energético del horno de coquización en CSH para el periodo 1. Fuente: Confección Propia.

Balance Energético en el Horno de Coquización		Energía Gcal/h
Aporte	Calor Aportado desde el Muro	50.45
	Total	50.45
Consumos	Calor Sensible de Gases Producidos	8.36
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Arrastrado por Coque	11.96
	Calor Coquización	28.55
	Total	50.45

Desde el balance anterior, se estima el calor requerido por hora para la coquización de 69 hornos, 10.3% humedad en mezcla, 7.7 %O<sub>2</sub> en gases quemados, y IDE de 0.94 Gcal/tch calculado al periodo. Mediante la Figura 10 se presenta la distribución de energía consumida en el horno.

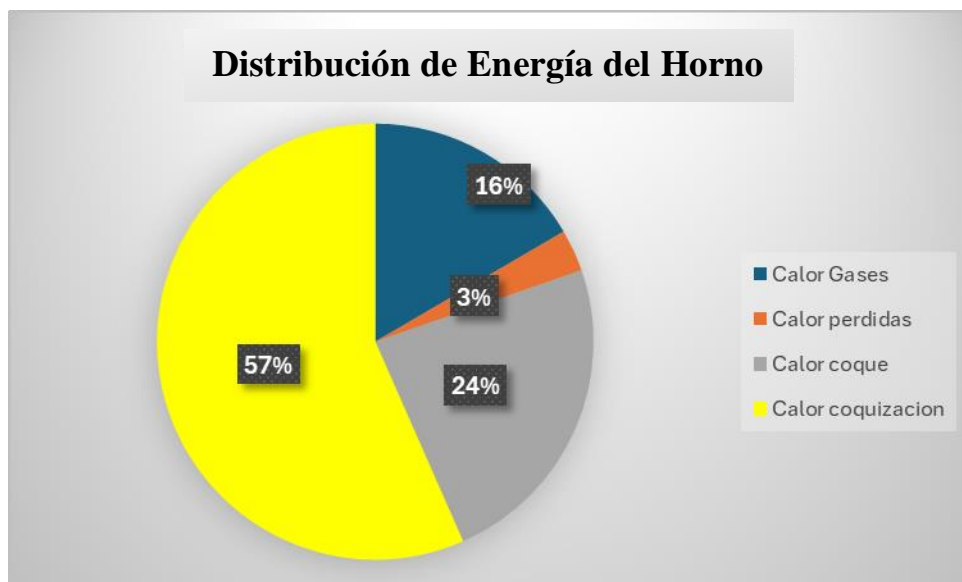


Figura 10. Balance de energía para el horno de CSH, periodo 1. Fuente: Confección Propia.

El segundo periodo de interés comprende desde el 1 de mayo del 2023, hasta el 1 de septiembre del mismo año, condiciones de operación son similares, sin embargo, existe la gran diferencia sobre la estación climática, pues al tratarse de una época de lluvias y menores temperaturas ambientales, se aprecia un significativo aumento en la humedad de la mezcla de carbones, a continuación, la Tabla 10, presenta las condiciones de operación presentes en el periodo mencionado.

Tabla 10. Condiciones operacionales comprendidas para el segundo periodo de interés comprendido entre 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

Variable Operacional	Valor Registrado
Ritmo de Empuje	69 Hornos /Día
Carga promedio Carbones	1 539 t
Humedad Mezcla de Carbones (%)	14.4
Rendimiento Carbón/Coque (%)	74.3
Flujo real de combustible suministrado	49 752 Nm <sup>3</sup> /h
Poder Calorífico GAHE	1 045 kcal/m <sup>3</sup>
Poder Calorífico GM	4 582 kcal/m <sup>3</sup>
% O <sub>2</sub> en Gases Quemados	5.3

Tabla 11. Balance másico en batería de CSH, en el periodo 2. Fuente: Confección Propia.

<b>Balance Másico Batería</b>		<b>Valor Registrado</b>
Balance en Muro		Nm <sup>3</sup> /h
Entradas	Flujo Combustible	49 752
	Flujo Aire	62 632
Salida	Flujo Gases Quemados	105 265
Balance en Horno		kg/día
Entrada	Mezcla de Carbones	1 539 568
Salidas	Masa Coque	979 573
	Masa Gases	559 995

Al realizar la comparativa entre la producción calculada de coque y la registrada se evidencia una variación de 40 kg, correspondiente al 0.004% del total. Además, la diferencia entre entrada y salida del muro corresponde a un 3.3%, dentro de rango.

Si bien el rendimiento carbón/coque es mayor para este periodo en comparación al anterior se aprecia que la producción de coque es menor considerando el mismo ritmo de empuje en ambos periodos, debido principalmente por la alta humedad en la mezcla de carbones.

Afectando directamente la masa de gases producto del horno, siendo aumentando considerablemente la masa de vapor de agua, cercano al 9% en comparación al periodo anterior. A continuación, la Tabla 12 presenta el desglose de la masa de gases para este periodo.

Tabla 12. Desglose de gases producidos por el horno de coquización de CSH, periodo 2.  
Fuente: Confección Propia.

Gases Producto Horno Coquización	Masa kg/día
Masa Gases	559 995
Masa Gas de Coque	273 239
Masa Vapor de Agua	221 698
Masa Alquitrán	39 062
Masa Amoniaco	22 675
Masa Ácido Sulfhídrico	3 321

Las siguientes figuras ilustran la distribución de masa para los gases producidos en el horno de coquización, en términos globales desde el balance de masa de ambos periodos, el aumento de masa de los gases corresponde al 1%, aparentando ser no tan influyente.

En la distribución de masa de los gases, del segundo periodo se evidenció como el gas coque, disminuyó su presencia considerablemente, lo que afectó la disponibilidad energética de la planta pues el gas mezcla, proveniente del gas coque, es el principal combustible en el proceso general de producción de acero.

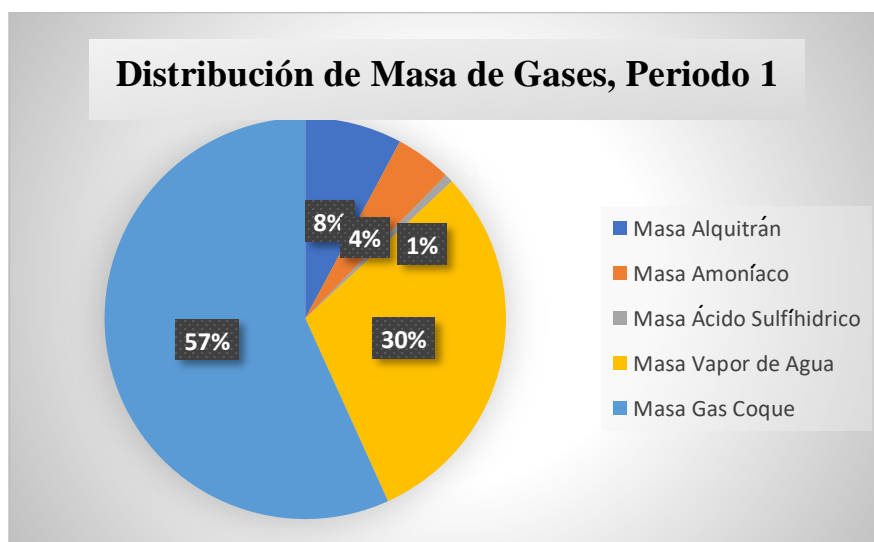


Figura 11. Distribución de gases producto durante el periodo 1, en hornos de coquización de CSH.  
Fuente: Confección Propia.

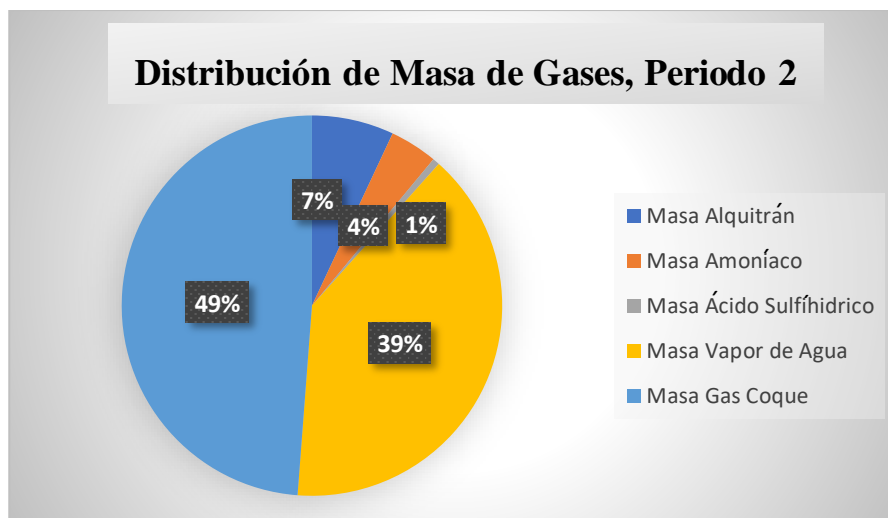


Figura 12. Distribución de gases producto durante el periodo 2, en hornos de coquización de CSH.  
Fuente: Confección Propia.

Luego, el balance energético es presentado en la Tabla 13, el aumento de calor aportado evidenciado es justificado principalmente en el aumento del flujo combustible suministrado en comparación al periodo anterior.

Tabla 13. Balance energético de Muro Combustión en CSH para el periodo 2.  
Fuente: Confección Propia.

Balance Energético Muro Combustión		Energía Gcal/h
Aportes	Calor Proveniente Reacciones	56.05
	Calor Sensible GAHE	0.17
	Total	56.22
Consumos	Calor Sensible en Gases Quemados	6.38
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Proveniente de Muros	48.27
	Total	56.22

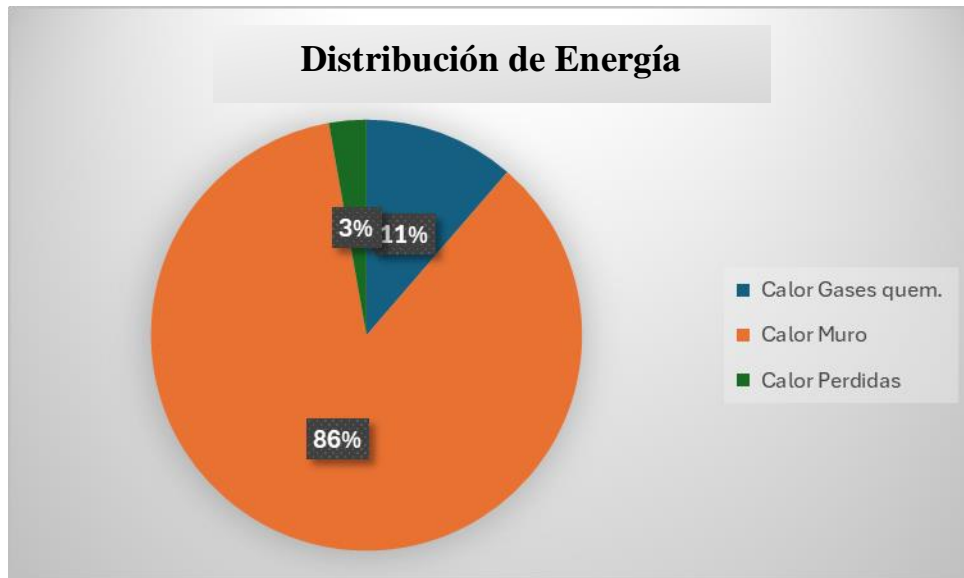


Figura 13. Distribución de energía consumida en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 2.  
Fuente: Confección Propia.

Al comparar los valores de calor aportado desde los muros para ambos periodos se aprecia que el primer periodo, de menor humedad aporta más calor, contrario a lo esperado, sin embargo, el segundo periodo reporta menor cantidad de oxígeno en gases quemados evidenciado en una mayor presencia del calor del muro, debido principalmente a menor arrastre de calor en los gases de combustión.

Tabla 14. Balance energético de horno de coquización en CSH para el periodo 2.  
Fuente: Confección Propia.

<b>Balance Energético Horno de Coquización</b>		<b>Energía Gcal/h</b>
Aporte	Calor Aportado desde el Muro	48.27
	Total	48.27
Consumos	Calor Sensible en Gases Producidos	8.68
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Arrastrado por Coque	11.48
	Calor Coquización	26.54
	Total	48.27

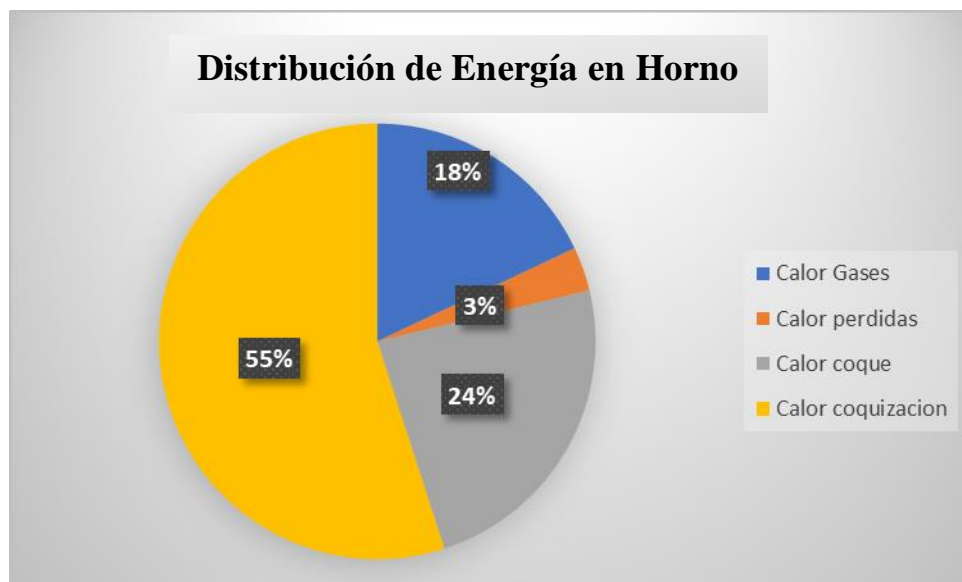


Figura 14. Balance de energía para el horno de CSH, período 2. Fuente: Confección Propia.

El calor de coquización es menor en comparación al periodo 1, alrededor de 2 Gcal/h con mismo ritmo de empuje, debido principalmente al aumento de humedad en la mezcla de carbones, sin embargo, reporta mejor IDE de 0.88 Gcal/tch evidenciado en el %O<sub>2</sub> principalmente.

El siguiente periodo considera una disminución en el ritmo de empuje a 63 hornos por día, el cual comprende desde 6 de septiembre del 2023, al 24 de enero del año 2024. Se aprecia una considerable disminución en la humedad, además del combustible suministrado comparado con el periodo anterior, La Tabla 15 contiene los datos operacionales del periodo mencionado.

Tabla 15. Condiciones operacionales comprendidas para el tercer periodo de interés comprendido entre 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

Variable Operacional	Valor Registrado
Ritmo de Empuje	63 Hornos /día
Carga promedio Carbones	1 421 t
Humedad Mezcla de Carbones (%)	11.6
Rendimiento Carbón/Coque (%)	74.3

Flujo real de combustible suministrado	45 735 Nm <sup>3</sup> /h
Poder Calorífico GAHE	1 007 kcal/m <sup>3</sup>
Poder Calorífico GM	4 344 kcal/m <sup>3</sup>
% O <sub>2</sub> en Gases Quemados	5.9 %

Una vez identificadas las condiciones operacionales, se procede con el balance másico para ambos reactores de la batería, el %O<sub>2</sub> incide directamente en la cantidad de aire utilizado para la combustión. Mediante la Tabla 16 se presenta el balance másico en ambos reactores presentes de la batería.

*Tabla 16. Balance másico para batería de CSH, en el periodo 3. Fuente: Confección Propia.*

<b>Balance Másico Batería</b>		<b>Valor Registrado</b>
Balance en Muro		Nm <sup>3</sup> /h
Entradas	Flujo Combustible	45 735
	Flujo Aire	59 656
Salida	Flujo Gases Quemados	98 884
Balance en Horno		kg/día
Entrada	Mezcla de carbones	1 421 707
Salidas	Masa coque	934 456
	Masa gases	487 251

Para verificar la efectividad del balance másico, se compara la producción calculada de coque con la producción real, donde la variación es de 260 kg aproximadamente, correspondientes al 0.03%, además, la diferencia entre entrada y salida del muro corresponde a 3.2% dentro de rango.

Mediante las relaciones establecidas en la metodología se desglosa el flujo de gas de la siguiente manera registrada en la Tabla 17. Posteriormente, en la Tabla 19 se registra el balance energético del muro.

Tabla 17. Desglose de gases producidos en horno de coquización de CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.

Gases Producto Horno Coquización	Masa kg/día
Masa Gases	487 251
Masa Gas de Coque	260 191
Masa Vapor de Agua	165 023
Masa Alquitrán	37 248
Masa Amoniaco	21 622
Masa Ácido Sulfhídrico	3 167

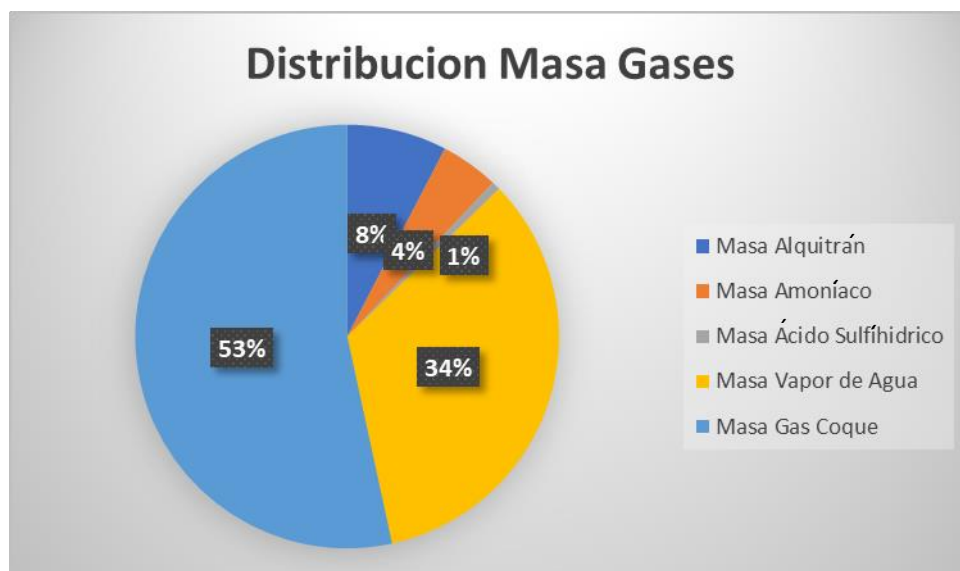


Figura 15. Distribución de la masa de gases en horno de coquización en CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.

La comparativa entre periodos debe ser cautelosa con las condiciones operacionales, puesto que el proceso depende completamente de estas. Si bien se fijan metas u objetivos de producción, establecer las condiciones de operación no es trivial, puesto que la producción es completamente de estas, por tanto, es necesario analizarlas en conjunto más que variables puntuales.

De todas formas, los periodos 1 y 3 presentan ligeras variaciones operacionales en cuanto a humedad, pero la diferencia de %O<sub>2</sub> en gases quemados es considerable, ya que el primer periodo presenta 2% más que el tercer periodo. Mediante la Tabla 18 se compara la producción de gas coque, según el ritmo de empuje comprendido en cada periodo.

*Tabla 18. Comparativa entre producción de gas coque, según ritmo de empuje en CSH. Fuente: Confección Propia.*

	Hornos Empujados	Masa/horno kg
Masa Gas Coque, 69 hornos/día	69	4326
Masa Gas Coque, 63 hornos/día	63	4130
Variación	6 hornos	5%

Si bien la diferencia es casi 200 kg, porcentualmente la diferencia representa un 5% de producción, además la disminución de producción de 6 hornos evidencia el efecto anteriormente comentado, pues la suma de todas las variables operacionales incide en la producción, por tanto, las relaciones entre variables no necesariamente son directamente proporcionales. A continuación, la Tabla 19 presenta el balance energético del muro de combustión durante este periodo.

*Tabla 19. Balance energético muro de combustión en CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.*

<b>Balance Energético Muro Combustión</b>		<b>Energía Gcal/h</b>
Aportes	Calor Proveniente Reacciones	50.40
	Calor Sensible GAHE	0.15
	Total	50.56
Consumos	Calor Sensible en Gases Quemados	6.18
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Proveniente de Muros	42.80
	Total	50.56

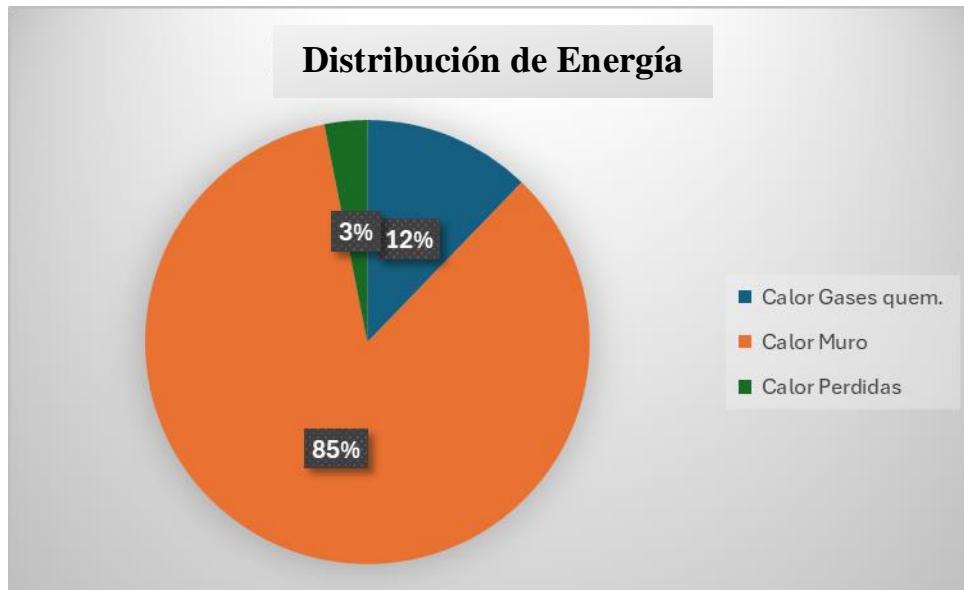


Figura 16. Distribución de energía utilizada en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 3.  
Fuente: Confección Propia.

Una vez estimada la cantidad de energía aportada hacia el proceso de coquización se cierra el balance energético para el horno de coquización, en la Tabla 20 se presentan los resultados obtenidos para el periodo comprendido según las condiciones operacionales presentes.

Tabla 20. Balance energético de Horno de coquización en CSH para el periodo 3.  
Fuente: Confección Propia.

<b>Balance Energético Horno de Coquización</b>		<b>Energía Gcal/h</b>
Aporte	Calor Aportado desde el Muro	42.80
	Total	42.80
Consumos	Calor Sensible de Gases Producidos	7.66
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Arrastrado por Coque	10.95
	Calor Coquización	22.61
	Total	42.80

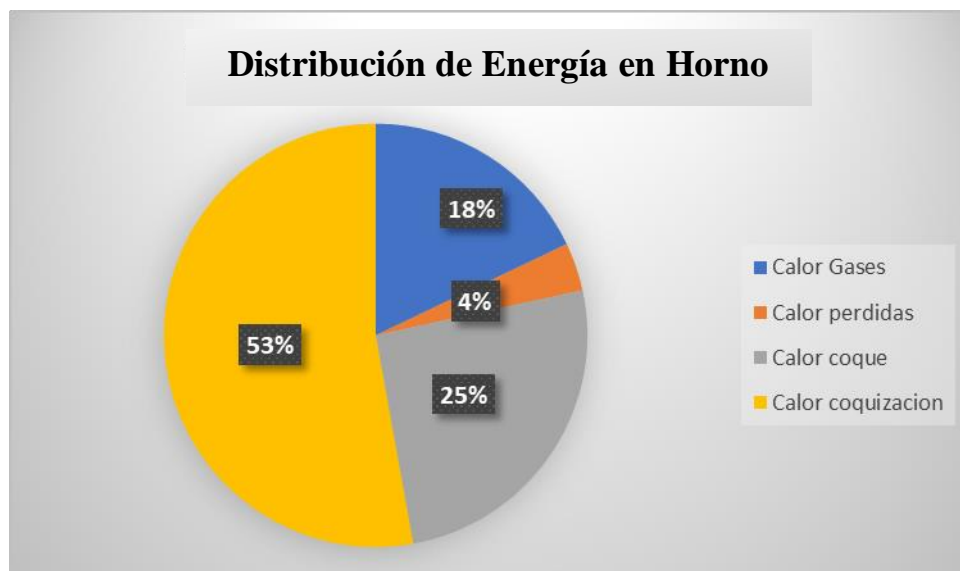


Figura 17. Balance de energía para el horno de CSH, periodo 3. Fuente: Confección Propia.

Previo al desarrollo, existía la hipótesis de que el periodo 1 y 3 tendrían desempeños similares debido a la similitud entre variables operacionales, sin embargo, la variación entre ambos calores de coquización es del 20%, sin embargo, el tercer periodo registra mejor desempeño del IDE con un valor calculado de 0.85 Gcal/tch.

El último periodo de interés comprende las fechas desde el 25 de enero al 25 de febrero del presente año, ambas fechas inclusive, donde la producción nuevamente se disminuye en tres hornos por día, quedando en 60 hornos por día. Las condiciones climáticas son más cálidas para este periodo, evidenciado en la disminución del 2% en humedad para la mezcla de carbones. La Tabla 21 presenta las condiciones operacionales para este periodo.

Tabla 21. Condiciones operacionales del periodo 4 entre 25/01/24 al 25/02/24 en CSH. Fuente: Confección propia.

Variable Operacional	Valor Registrado
Ritmo de Empuje	60 Hornos /Día
Carga promedio Carbones	1 341 t
Humedad Mezcla de Carbones (%)	9.3
Rendimiento Carbón/Coque (%)	73.8

Flujo real de combustible suministrado	46 175 Nm <sup>3</sup> /h
Poder Calorífico GAHE	986 kcal/m <sup>3</sup>
Poder Calorífico GM	4 210 kcal/m <sup>3</sup>
% O <sub>2</sub> en Gases Quemados	5.1

Es evidente el aumento del combustible suministrado cercano a los 500 Nm<sup>3</sup> en comparación al periodo anterior, a pesar de presentar menor humedad y menor ritmo de empuje, por tanto, es necesario evaluar todas las variables operacionales para el análisis, pues si bien disminuye la humedad, se prevé menos energía necesaria puesto que es menor la cantidad de agua por evaporar.

Sin embargo, el rendimiento carbón/coque también disminuye, por tanto, se volatiliza mayor materia desde la mezcla de carbones, lo cual es ventajoso para la producción de subproductos como el gas mezcla, pero afecta la producción de coque.

Mediante la Figura 18, es apreciable la distribución de la masa de gases producidos por el horno de coquización, para tercer y cuarto periodo se aprecia de mejor manera el efecto de las variables operativas, puesto con las condiciones operacionales son similares.

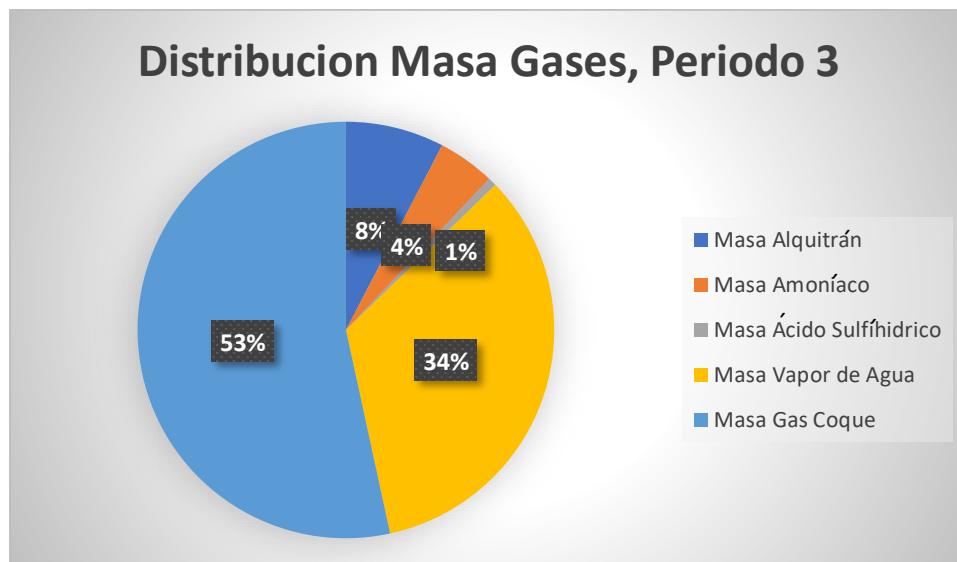


Figura 18. Distribución de la masa de gases producidos en horno de coquización para un ritmo de empuje correspondiente a 63 hornos/día, en CSH. Fuente: Confección Propia.

Desde la distribución, es apreciable la disminución de vapor de agua producido, debido principalmente a la disminución de humedad, también es apreciable el efecto del rendimiento carbón/coque, pues se evidencia un aumento cercano al 5% de gas coque para el cuarto periodo.

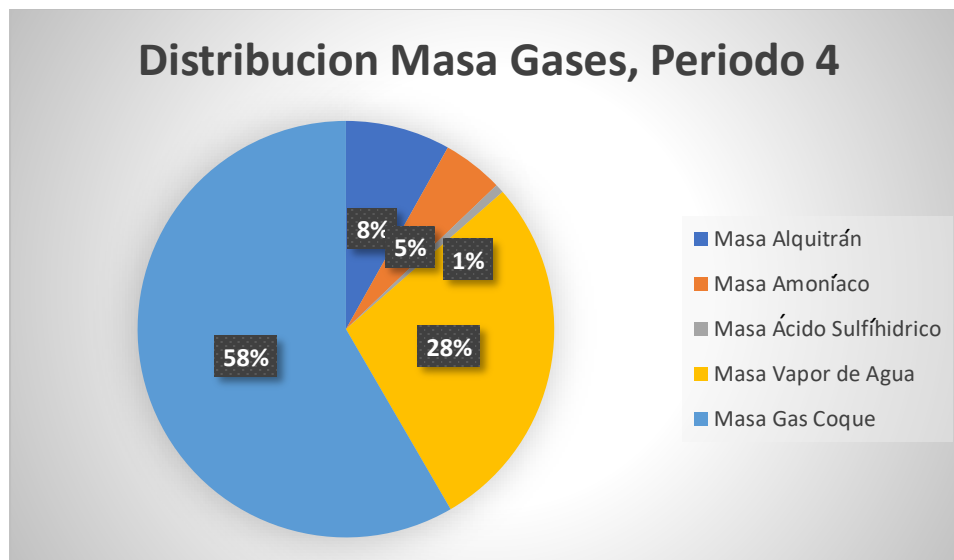


Figura 19. Distribución de la masa de gases producidos en horno de coquización para un ritmo de empuje correspondiente a 60 hornos/día, en CSH. Fuente: Confección Propia.

El resto de los resultados procedentes del balance másico se presenta en la Tabla 22, donde se registran las entradas y salidas involucradas en la operación de la batería.

Tabla 22. Balance másico para batería de CSH, en el periodo 4. Fuente: Confección Propia.

Balance Másico Batería		Valor Registrado
Balance en Muro		Nm <sup>3</sup> /h
Entradas	Flujo Combustible	46 175
	Flujo Aire	58 269
Salida	Flujo Gases Quemados	97 809
Balance en Horno		kg/día
Entrada	Mezcla de Carbones	1 341 458
Salidas	Masa Coque	898 069
	Masa Gases	443 390

La diferencia en la masa de coque entre lo producido y lo estimado es de 9 kg cercano al 0.001%, y la diferencia entre flujos de entrada y salida para el muro corresponde al 3.3% dentro de rango, la distribución completa de gases producidos en el horno es presentada en la Tabla 23.

Tabla 23. Desglose de gases producidos en horno de coquización de CSH, periodo 4.  
Fuente: Confección Propia.

Gases Producto en Horno de Coquización	Masa kg/día
Masa Gases	443 390
Masa Gas de Coque	258 191
Masa Vapor de Agua	124 457
Masa Alquitrán	36 072
Masa Amoníaco	20 939
Masa Ácido Sulfhídrico	3 067

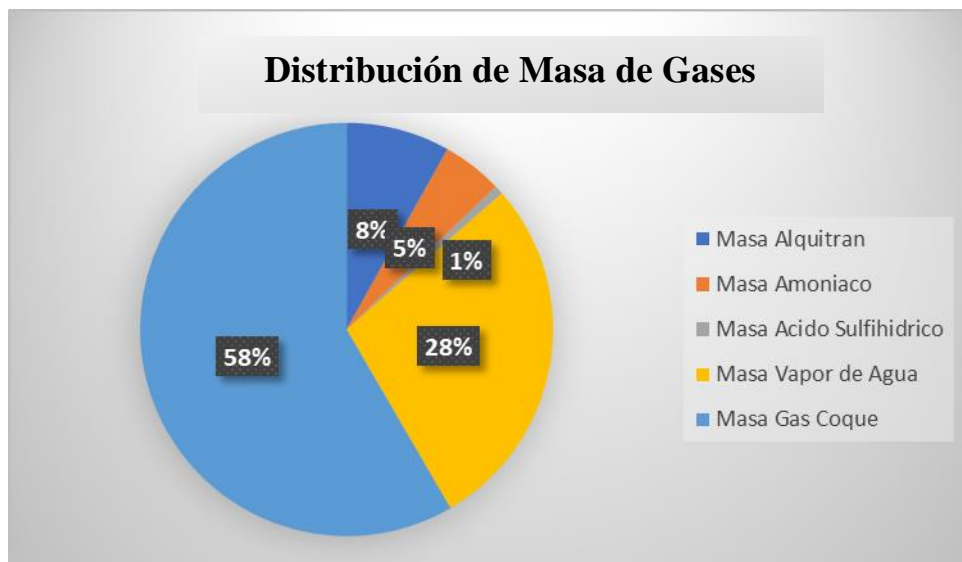


Figura 20. Distribución de la masa de gases en horno de coquización en CSH, periodo 4.  
Fuente: Confección Propia.

Se procede al balance energético de las unidades presentes en la batería, horno y muro, donde la Tabla 24, presenta el balance energético del muro para el periodo mencionado donde se mantiene la tendencia en la disminución de la energía suministrada a la batería según el descenso en el ritmo de empuje.

Tabla 24. Balance energético de muro Combustión en CSH, periodo 4. Fuente: Confección Propia.

Balance Energético Muro Combustión		Energía Gcal/h
Aportes	Calor Proveniente de Reacciones	52.90
	Calor Sensible GAHE	0.16
	Total	53.05
Consumos	Calor Sensible de Gases Quemados	6.14
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Proveniente de Muros	45.33
	Total	53.05

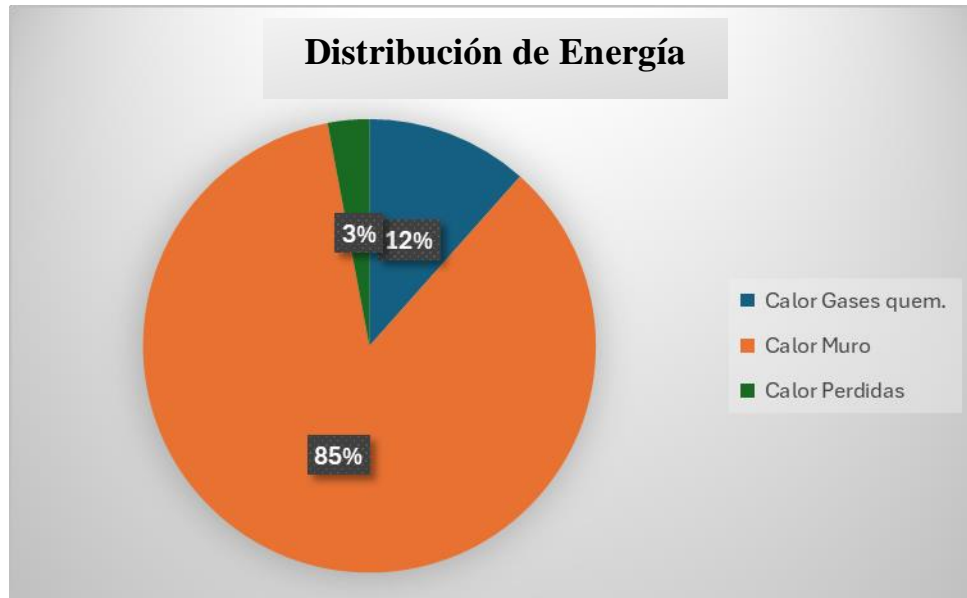


Figura 21. Distribución de energía consumida en el muro de combustión, en batería CSH, periodo 4. Fuente: Confección propia.

Se aprecia la tendencia general de los muros de combustión para los cuatro periodos donde el calor aportado desde el muro es 85%, Una vez estimada la cantidad de energía aportada hacia el proceso de coquización se cierra el balance energético para el horno de coquización presentado en la Tabla 25. Luego, la Figura 22 presenta la distribución de consumos energéticos en el horno, el IDE calculado para este periodo corresponde a 0.95 Gcal/tch registrando el mayor valor.

Tabla 25. Balance energético de horno de coquización en CSH para el periodo 3.  
Fuente: Confección Propia.

<b>Balance Energético Horno de Coquización</b>		<b>Energía Gcal/h</b>
Aporte	Calor Proveniente de Muros	45.33
	Total	45.33
Consumos	Calor Sensible Gases Producidos	7.09
	Calor Pérdidas	1.58
	Calor Arrastrado por Coque	10.52
	Calor Coquización	26.15
	Total	45.33

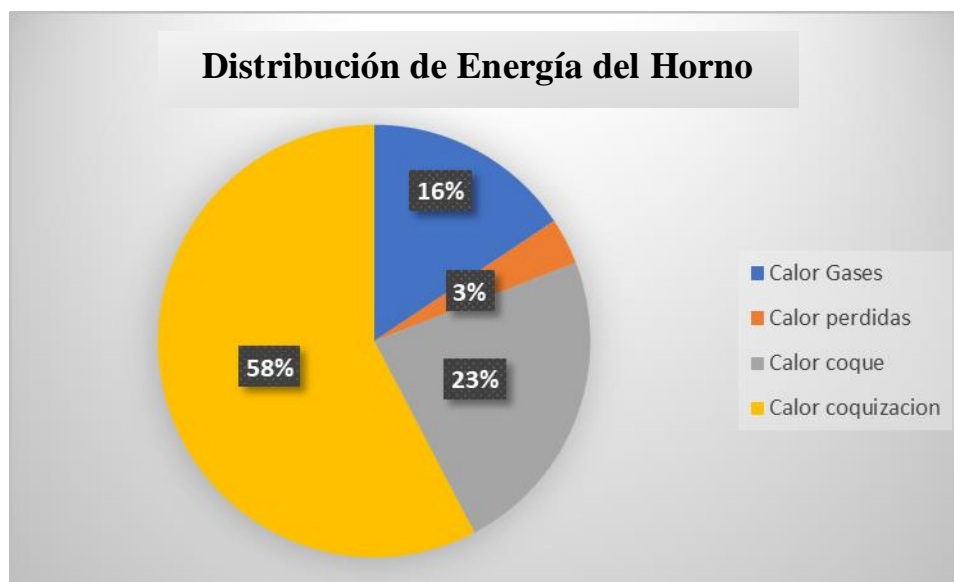


Figura 22. Balance de energía para el horno de CSH, periodo 4. Fuente: Confección Propia.

Determinada la cantidad de calor disponible para la coquización, según las condiciones del periodo correspondiente, se organiza la información en la Tabla 26 y se presenta la relación entre el calor y el ritmo de empuje en la figura, donde queda demostrada la relación no lineal entre las variables de operación y la energía disponible para el proceso. De todas formas, existe una tendencia en el valor de coquización la cual indica directrices para establecer parámetros operativos para distintos ritmos de empuje.

Tabla 26. Principales variables de operación y calor de coquización referido a cada periodo y condiciones presentes en batería de CSH. Fuente: Confección Propia.

	Calor Coquización Gcal/h	Carga Base Húmeda kg/día	IDE	Rend Carbón /Coque %	Humedad %	Flujo GAHE Nm <sup>3</sup> /h	PC GAHE kcal/m <sup>3</sup>	%O <sub>2</sub> G.qem	T°G.qem °C
<b>Periodo 1</b>	28.55	1 546 724	0.94	73.55	10.27	48 543	1 086	7.74	220.06
<b>Periodo 2</b>	26.54	1 539 568	0.88	74.33	14.40	49 752	1 045	5.27	205.86
<b>Periodo 3</b>	22.61	1 421 707	0.85	74.36	11.61	45 735	1 007	5.87	211.96
<b>Periodo 4</b>	26.15	1 341 458	0.95	73.79	9.28	46 175	986	5.07	212.53

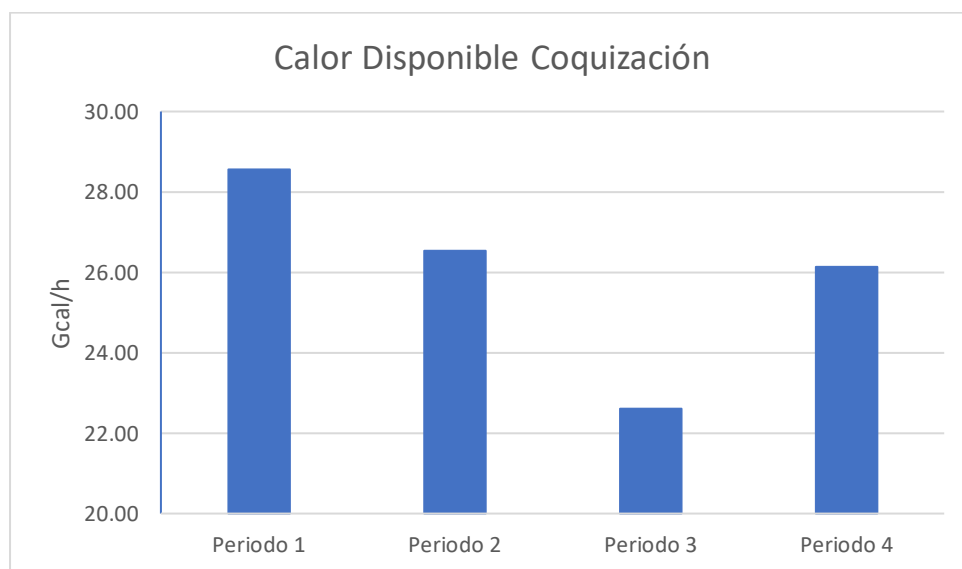


Figura 23. Calor disponible para coquización, para cada periodo según sus condiciones operacionales presentes, para la batería de CSH. Fuente: Confección Propia.

## Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones

La relación entre variables no es directa ya que necesita el análisis y evaluación del conjunto de variables operacionales para definir la energía disponible, tales como carga de carbones, rendimiento carbón/coque, humedad de la mezcla, poder calorífico de gases de combustión y %O<sub>2</sub> de gases quemados. Es clave en la toma de decisión tener mediciones y levantamiento de información acertado en cuanto a lugares físicos de muestreo y calidad de equipos de medición.

La batería de CSH comenzó la operación en los años 90 y registró un progresivo deterioro, en los más de 30 años de servicio, evidenciado en las filtraciones de calor, presentes en su momento, por tanto, era necesario realizar mantenimientos preventivos.

Mediante la metodología se estima el calor de coquización requerido para el proceso de pirólisis de carbones situado en 23 400 Mcal/h principalmente suministrado por contacto desde muros adyacentes al horno. Para alcanzar el valor objetivo de calor de coquización, se ajusta el flujo de combustible hasta alcanzar el valor deseado luego de considerar los consumos de calor identificados como; Calor Gases Horno, Calor Gases Quemados, Calor Coque, Calor de Pérdidas.

Como el muro de combustión es el principal aporte energético del proceso en si, debe ser revisado e inspeccionado de manera periódica para disminuir pérdidas energéticas desde esta unidad, es importante manejar de forma acertada la pausa, pues manejar valores excesivamente altos es contraproducente para la economía del proceso, por ejemplo, valores superiores a 200 s de pausa implica al menos un 15% de energía desperdiciada del flujo combustible suministrado.

La humedad, en valores superiores al 10% evidencia efecto notorio en la producción de coque y subproductos, pues el volumen de carga definido no varía, por tanto, valores mayores de humedad disminuyen la carga seca final dentro del reactor.

Al comparar periodos 1 y 2 donde la diferencia de humedad provocó una variación de 2000 Mcal/h, el costo asociado se calcula según el factor de costo energético establecido en CSH, 48 \$ USD/Gcal, es decir, el aumento del 4% de humedad, implicó un aumento de 96 \$ USD/hora, aproximadamente 2 300 \$ USD/día, esta relación considera periodos de igual ritmo de empuje.

Se busca que el IDE de operación no supere el 0.85 Gcal/tcs, establecido por el directorio para mantener costos, sin embargo, el valor calculado para los periodos es mayor, debido principalmente al estado de la batería.

La implicancia del rendimiento carbón/coque, incide en la producción de coque, gas coque y subproductos, mayores valores de esta relación implica mayor producción de coque, disminuyendo la producción de gas mezcla principal combustible utilizado de forma transversal en toda la compañía.

Es importante tener criterio a la hora de tomar decisión sobre variar el flujo combustible ingresado a la batería, pues variar el flujo implica carburar la batería nuevamente para la nueva condición de operación, buscando correcta combustión, realizando ajustes de succiones activas e inactivas para la evacuación de gases quemados, además de ajustar la presión del tope para asegurar una correcta distribución de la energía.

Relacionado al combustible es importante monitorear constantemente el Índice de Wobbe, parámetro de control que verifica la eficacia y calidad de la mezcla de gases, dado que el GAHE es una mezcla de gases, este parámetro verifica la calidad del combustible empleado, clave para el control de emisiones ambientales, una correcta combustión evita la producción de óxidos nitrosos,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ , principales agentes de emisiones contaminantes.

En la combustión de los muros existe mayor control sobre la calidad y efectividad de este mismo sobre la marcha. A continuación, se incluyen una serie de recomendaciones para la preservación y operación de la batería, la principal recomendación es la preservación y mantención de refractarios de los hornos de coquización.

- Incorporar un equipo de medición para el caudal de aire ingresado a las cámaras de combustión, para verificar que el volumen de aire sea el adecuado para la combustión.
- Añadir otro equipo para la medición de  $\% \text{O}_2$  en gases quemados, en la zona subterránea de evacuación de gases combustión, actualmente el equipo presente se encuentra en la base de la chimenea evacuadora de gases quemados, la cual podría incluir infiltración de aire, alterando el valor reportado.
- Realizar pruebas de caja y laboratorio, para mezclas de carbones, para caracterizar de mejor manera la mezcla pues los embarques negociados si bien traen hoja técnica de venta no siempre cuenta con información acertada sobre el embarque, por tanto, este tipo de pruebas fisicoquímicas permite determinar la calidad y prestaciones del producto comprado.

- Control de la humedad de mezcla de carbones, clave en la producción de coque y subproductos, debido a que cada aumento del porcentaje de humedad incide directamente en la energía disponible para la coquización, ajustando temperatura meta de operación, se contrarresta el efecto provocado por la humedad.
- El tiempo muerto mínimo de la batería por hora corresponde a 4 minutos, aumentar el valor de pausa evita elevar la temperatura de operación sobre la meta, al operar pausas muy altas es más conveniente disminuir el flujo de combustión, para mantener el control de la pausa.
- Precalentar la mezcla de carbones en periodos de alta humedad ambiental, para aumentar la cantidad cargada en base seca y no afectar tanto la producción de coque, subproductos y temperatura meta.
- Rutina diaria de descarbonización para bocas de carga, buscando la continuidad de la limpieza en todos los hornos de coquización.
- Realizar un levantamiento completo de las unidades encargadas de combustión, regeneradores de aire graficar bandejas y registrar tamaños, para verificar caudal de operación.
- Rutina diaria de aseo en placas de orifico, manejar stock de barras de acero para regular relación aire/gas de las *Waste Heat*, junto con lubricación y mantención de estas unidades, realizar mediciones periódicas sobre la presión del tope.
- Mediciones de temperatura a media y baja altura para verificar que la temperatura inferior sea superior, asegurando correcta distribución.
- Verificar periódicamente estado de rociadores de licor encargados de mantener temperaturas de operación en margen y disminuir el calor perdido por irradiación térmica.
- Realizar una campaña de sellado y mantención de mampostería y zonas de alta temperatura para controlar fugas de calor en los equipos asociados al intercambio de calor, puesto que estos equipos cuentan con las pérdidas más considerables.

## Capítulo 6 Glosario

- Stand Pipe: Unidad encargada de enfriar y acopiar gas coque crudo, para su transporte a la colectora de gases.
- Waste Heat: Unidad encargada de evacuar gases de combustión hacia la chimenea
- Colectora de gases: Unidad encargada de enfriar y separar fases del gas producto de coquización.
- Carro apagado: Unidad donde se deposita el coque caliente recién empujado del horno para ser rociado con agua para disminuir su temperatura y facilitar transporte y acopio.
- Soldadura cerámica: Proceso de revestimiento de interiores cerámicos de los hornos, consiste en soplar silice en compañía de oxígeno en alta presión.
- Reactivo en exceso: Tipo de reactivo, donde su exceso de presencia, sobre lo teórico no provoca aumento de la producción de productos.
- Maquina cargadora: Unidad ubicada en el tope de la batería encargada de surtir las bocas de carga de los hornos con la mezcla de carbones.
- Maquina empujadora: Unidad encargada de empujar el coque desde el lado mar hacia lado cerro.
- GM: Gas Mezcla.
- CSR: Coke Strength after Reaction. Resistencia del Coque luego de Reaccionar
- CRI: Coke Reactivity Index. Indice de Reactividad del Coque
- M40: Miccum 40.
- M10: Miccum 10.
- GAH: Gas Alto Horno.
- GAHE: Gas Alto Horno Enriquecido.
- mmca: Milímetros de columna de agua.
- kg/tcs: Kilogramo producido por tonelada de carbón seco cargado.
- AAHH: Altos Hornos.

## Capítulo 7 Bibliografía

- Schiestel, P. Evans, C. Kesik, J. Todoschuk, T. (2009). *Cokemaking Course*. (9<sup>th</sup> ed). Canada: McMaster University.
- (1962) *Manual de Operaciones Oven Battery*. Chile; CSH Coke Oven Project.
- McGannon, H. (1971) *The Making, Shaping and Treating of Steel*. (9<sup>th</sup> ed). Estados Unidos: United States Steel Corporation.
- H. Lowry. (1963). *Chemistry of Coal Utilization, Vol I, II*, Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
- Green, W. Southard, M. (2018). *Perry's Chemical Engineer's Handbook Edition*. (9<sup>th</sup> ed). Estados Unidos: Mc Graw Hill Education.

## Capítulo 8 Referencias

[1]: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-acero>

[2]: <https://www.mch.cl/2018/03/06/empresas-siderurgicas-chilenas-alerta-tras-anuncio-medidas-restrictivas-parte-eeuu/#>

[3]: <https://www.latercera.com/pulso/noticia/cap-reporta-perdidas-y-caida-de-ingresos-en-el-primer-semestre-por-disminucion-en-precios-internacionales-del-hierro-y-acero/EVJOSLYBSJBEVGRWJVJURJY2DY/>

[4]: [https://www.capacero.cl/cap\\_acero/site/edic/base/port/todos\\_productos.html](https://www.capacero.cl/cap_acero/site/edic/base/port/todos_productos.html)

[5]: <https://www.df.cl/empresas/mineria/crisis-en-siderurgica-de-huachipato-cpc-bio-bio-dice-que-2-400-empleos>

[6]: [https://www.capacero.cl/cap\\_acero/site/edic/base/port/infografia.html](https://www.capacero.cl/cap_acero/site/edic/base/port/infografia.html)

[7]: <https://www.bhp.com/es/what-we-do/products/metallurgical-coal>

[8]: <https://academia-lab.com/enciclopedia/alto-horno/>

[9]: <https://www.uv.es/madomin/miweb/leydelavoisier.html>

## Capítulo 9 Anexos

Tabla 27 Anexo-1. Composición flujo GAHE, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH.

Fuente: Confección Propia.

	DETALLE FLUJO COMBUSTIBLE			Periodo 1		% Energía
	GAHE	Flujo m3/h	kmoles disp	Cp° cal/mol*K	Energía Gcal	
<b>H2</b>	6.2%	3 006	134.2	6.943	0.009	5.7%
<b>C2H4</b>	0.4%	209	9.4	10.248	0.001	0.6%
<b>CH4</b>	3.8%	1 833	81.8	8.530	0.007	4.3%
<b>CO</b>	23.2%	11 245	502.0	6.965	0.035	21.4%
<b>CO2</b>	20.7%	10 065	449.3	8.872	0.040	24.4%
<b>N2</b>	31.8%	15 445	689.5	6.961	0.048	29.4%
<b>O2</b>	5.4%	2 625	117.2	7.021	0.008	5.0%
<b>H2O</b>	8.5%	4 114	183.7	8.032	0.015	9.0%
	100%	48 543		Total	0.16	100.00%

Tabla 28 Anexo-2. Composición flujo de gases quemados, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

	GASES QUEMADOS			T salida °C	220	
	Flujo m3	kmoles	Porcentaje	Cp cal/mol	Energía Gcal	% Energía
<b>CO2</b>	3 298	147.2	6.9%	8.872	0.31	8.4%
<b>N2</b>	34 651	1546.9	72.2%	6.961	2.53	69.2%
<b>O2</b>	2 400	107.1	5.0%	7.021	0.18	4.8%
<b>H2O</b>	7 653	341.7	15.9%	8.032	0.64	17.6%
	48 003		100%	Total	3.66	100%

Tabla 29 Anexo-3. Parámetros de operación utilizados en la mezcla de GAHE, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>GAS ALTO HORNO ENRIQUECIDO</b>		
Flujo GAH	43 757	Nm3/h
P.C. GAH	632	kcal/m3
Flujo GM	5 237	Nm3/h
P.C. GM	4 841	kcal/m3
Flujo GAHE	48 543	Nm3/h
P.C. GAHE	1 086	kcal/m3

Tabla 30 Anexo-4. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 1, desde el 01/01/23 al 27/03/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>Reacción</b>	<b>Delta H° kcal/kmol</b>	<b>kmol GAHE</b>	<b>E. GAHE Gcal</b>	<b>% Energía</b>
$H_2 + 0.5 O_2 = H_2O$	-57 798	134.21	-7.76	12.9%
$CO + 0.5 O_2 = CO_2$	-67 630	502.03	-33.95	56.2%
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$	-191 816	81.83	-15.70	26.0%
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$	-316 220	9.35	-2.96	4.9%
		<b>Total</b>	<b>-60.36</b>	<b>100.0%</b>

Tabla 31 Anexo 5. Composición flujo GAHE, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH.

Fuente: Confección Propia.

	DETALLE FLUJO COMBUSTIBLE			Periodo 2		% Energia
	GAHE	Flujo m3/h	kmoles disp	Cp° cal/mol*K	Energia Gcal	
<b>H2</b>	5.0%	2 475	110.5	6.943	0.008	4.6%
<b>C2H4</b>	0.3%	159	7.1	10.248	0.001	0.4%
<b>CH4</b>	2.8%	1 391	62.1	8.530	0.005	3.2%
<b>CO</b>	23.6%	11 763	525.1	6.965	0.037	21.9%
<b>CO2</b>	21.3%	10 609	473.6	8.872	0.042	25.2%
<b>N2</b>	32.6%	16 241	725.0	6.961	0.050	30.2%
<b>O2</b>	5.6%	2 767	123.5	7.021	0.009	5.2%
<b>H2O</b>	8.7%	4 349	194.2	8.032	0.016	9.3%
	100%	49 752		Total	0.17	100.00%

Tabla 32 Anexo-6. Composición flujo Gases Quemados, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

	GASES QUEMADOS			T salida °C	206	
	Flujo m3	kmoles	Porcentaje	Cp cal/mol	Energía Gcal	% Energía
<b>CO2</b>	24 080	1 075.0	22.9%	8.872	1.72	27.1%
<b>N2</b>	65 720	2 933.9	62.4%	6.961	3.69	57.9%
<b>O2</b>	5 543	247.4	5.3%	7.021	0.31	4.9%
<b>H2O</b>	9 923	443.0	9.4%	8.032	0.64	10.1%
	105 265		100%	Total	6.38	100%

Tabla 33 Anexo-7. Parámetros de operación utilizados en la mezcla de GAHE, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>GAS ALTO HORNO ENRIQUECIDO</b>		
Flujo GAH	45 031	Nm3/h
P.C. GAH	738	kcal/m3
Flujo GM	3 973	Nm3/h
P.C. GM	4 582	kcal/m3
Flujo GAHE	49 752	Nm3/h
P.C. GAHE	1 045	kcal/m3

Tabla 34 Anexo-8. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 2, desde el 01/05/23 al 01/09/23 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>Reacción</b>	<b>Delta H° kcal/kmol</b>	<b>kmol GAHE</b>	<b>E. GAHE Gcal</b>	<b>% Energía</b>
$H_2 + 0.5 O_2 = H_2O$	-57 798	110.48	-6.39	11.4%
$CO + 0.5 O_2 = CO_2$	-67 630	525.11	-35.51	63.4%
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$	-191 816	62.08	-11.91	21.2%
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$	-316 220	7.10	-2.24	4.0%
		<b>Total</b>	<b>-56.05</b>	<b>100.0%</b>

Tabla 35 Anexo-9. Composición flujo GAHE, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH.

Fuente: Confección Propia.

	DETALLE FLUJO COMBUSTIBLE			Periodo 3		% Energia
	GAHE	Flujo m3/h	kmoles disp	Cp° cal/mol*K	Energia Gcal	
<b>H2</b>	4.7%	2 158	96.3	6.943	0.007	4.4%
<b>C2H4</b>	0.3%	135	6.0	10.248	0.001	0.4%
<b>CH4</b>	2.6%	1 184	52.9	8.530	0.005	2.9%
<b>CO</b>	23.7%	10 859	484.8	6.965	0.034	22.0%
<b>CO2</b>	21.4%	9 809	437.9	8.872	0.039	25.3%
<b>N2</b>	32.8%	15 009	670.1	6.961	0.047	30.4%
<b>O2</b>	5.6%	2 558	114.2	7.021	0.008	5.2%
<b>H2O</b>	8.8%	4 023	179.6	8.032	0.014	9.4%
	100%	45 735		Total	0.15	100.00%

Tabla 36 Anexo-10. Composición flujo Gases Quemados, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

	GASES QUEMADOS			T salida °C	212	
	Flujo m3	kmoles	Porcentaje	Cp cal/mol	Energía Gcal	% Energía
<b>CO2</b>	22 122	987.6	22.4%	8.872	1.64	26.5%
<b>N2</b>	62 138	2 774.0	62.8%	6.961	3.61	58.4%
<b>O2</b>	5 803	259.1	5.9%	7.021	0.34	5.5%
<b>H2O</b>	8 821	393.8	8.9%	8.032	0.59	9.6%
	98 884		100%	Total	6.18	100%

Tabla 37 Anexo-11. Parámetros de operación utilizados en la mezcla de GAHE, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>GAS ALTO HORNO ENRIQUECIDO</b>		
Flujo GAH	41 122	Nm3/h
P.C. GAH	741	kcal/m3
Flujo GM	3 384	Nm3/h
P.C. GM	4 344	kcal/m3
Flujo GAHE	45 735	Nm3/h
P.C. GAHE	1 007	kcal/m3

Tabla 38 Anexo-12. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 3, desde el 06/09/23 al 24/01/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>Reacción</b>	<b>Delta H° kcal/kmol</b>	<b>kmol GAHE</b>	<b>E. GAHE Gcal</b>	<b>% Energía</b>
$H_2 + 0.5 O_2 = H_2O$	-57 798	96.34	-5.57	11.0%
$CO + 0.5 O_2 = CO_2$	-67 630	484.76	-32.78	65.0%
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$	-191 816	52.87	-10.14	20.1%
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$	-316 220	6.04	-1.91	3.8%
		<b>Total</b>	<b>-50.40</b>	<b>100.0%</b>

Tabla 39 Anexo-13. Composición flujo GAHE, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

	DETALLE FLUJO COMBUSTIBLE			Periodo 4		% Energía
	GAHE	Flujo m3/h	kmoles disp	Cp° cal/mol*K	Energía Gcal	
<b>H2</b>	5.2%	2 388	106.6	6.943	0.007	4.8%
<b>C2H4</b>	0.3%	156	7.0	10.248	0.001	0.5%
<b>CH4</b>	3.0%	1 364	60.9	8.530	0.005	3.4%
<b>CO</b>	23.6%	10 881	485.8	6.965	0.034	21.8%
<b>CO2</b>	21.2%	9 802	437.6	8.872	0.039	25.0%
<b>N2</b>	32.5%	15 012	670.2	6.961	0.047	30.1%
<b>O2</b>	5.5%	2 556	114.1	7.021	0.008	5.2%
<b>H2O</b>	8.7%	4 016	179.3	8.032	0.014	9.3%
	100%	46 175		Total	0.16	100.00%

Tabla 40 Anexo 14. Composición flujo Gases Quemados, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

	GASES QUEMADOS			T salida °C	213	
	Flujo m3	kmoles	Porcentaje	Cp cal/mol	Energía Gcal	% Energía
<b>CO2</b>	22 359	998.2	22.9%	8.872	1.66	27.0%
<b>N2</b>	61 044	2 725.2	62.4%	6.961	3.56	57.9%
<b>O2</b>	4 962	221.5	5.1%	7.021	0.29	4.7%
<b>H2O</b>	9 444	421.6	9.7%	8.032	0.64	10.3%
	97 809		100%	Total	6.14	100%

Tabla 41 Anexo-15. Composición flujo GAHE, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>GAS ALTO HORNO ENRIQUECIDO</b>		
Flujo GAH	41 898	Nm3/h
P.C. GAH	689	kcal/m3
Flujo GM	3 897	Nm3/h
P.C. GM	4 210	kcal/m3
Flujo GAHE	46 175	Nm3/h
P.C. GAHE	986	kcal/m3

Tabla 42 Anexo-16. Reacciones de combustión y energía asociada, para el periodo 4, desde el 25/01/24 al 25/03/24 en CSH. Fuente: Confección Propia.

<b>Reacción</b>	<b>Delta H° kcal/kmol</b>	<b>kmol GAHE</b>	<b>E. GAHE Gcal</b>	<b>% Energía</b>
$H_2 + 0.5 O_2 = H_2O$	-57 798	106.60	-6.16	11.6%
$CO + 0.5 O_2 = CO_2$	-67 630	485.77	-32.85	62.1%
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$	-191 816	60.90	-11.68	22.1%
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2 CO_2 + 2 H_2O$	-316 220	6.96	-2.20	4.2%
		<b>Total</b>	<b>-52.90</b>	<b>100.0%</b>

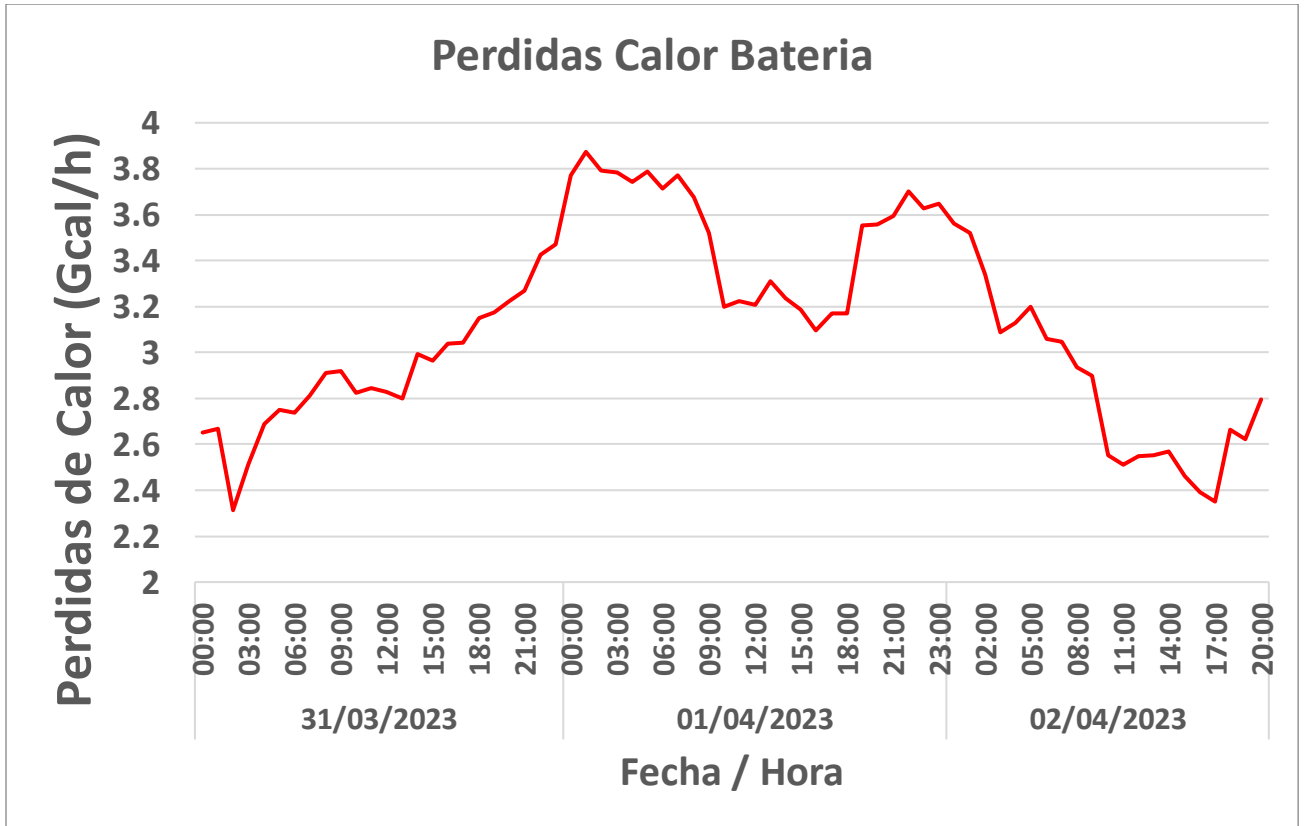


Figura 24 Anexo-17. Estimación de pérdidas de calor durante calentamiento de batería CSH sin empuje de hornos. Fuente: Confección Propia.

## Capítulo 10 Resumen FI

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

<b>Título: “Balance de Energía en Batería Planta Coque Compañía Siderúrgica Huachipato”</b>
<b>Nombre Memorista: Aníbal Rodríguez San Martín</b>

<b>Modalidad</b>	Proyecto	<b>Profesor Guía:</b>  Prof. Eduardo Balladares V.
<b>Concepto</b>		
<b>Calificación</b>		
<b>Fecha</b>	20.01.2025	
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Ingeniero Supervisor: Gustavo Ramírez G</b>
		<b>Institución: Compañía Siderúrgica Huachipato</b>

<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>	
Prof. Fernando Parada L.	Prof. Víctor Parra S.

<b>Resumen</b>
El proyecto considera un desarrollo de balance masico y energético en el edificio refractario Batería de CSH, la cual está compuesto por hornos de coquización donde se deposita la mezcla de carbones para su coquización continua por alrededor de 20 horas, es proceso batch pues el reactor es cargado y tras cumplir el tiempo de residencia establecido es empujado al exterior y repite el proceso, el número n de hornos para esta batería es de 58, adyacente a cada lado del horno se encuentran los muros de combustión, unidad

encargada de suministrar el calor necesario para la pirolisis del carbón ocurrida al interior del horno, ya que las características intrínsecas de la coquización involucran ausencia de oxígeno es necesaria suministrar el calor por contacto a cada lado, involucrando 59 muros de combustión, a través del levantamiento de información se establecen relaciones de conveniencia para desarrollar el proyecto, las cuales están validadas en la metodología el análisis abarca 4 periodos de interés donde se aprecian tendencias comentadas en las conclusiones además de incluir recomendaciones para la operación.