

Ejemplo de balance macroscópico de energía térmica (Reverbero)

Durante el proceso de fundición, se requiere de la fusión de grandes cantidades de metal líquido, en el caso de fundiciones no ferrosas, uno de los hornos más empleados es el horno de reverbero.

El horno de reverbero puede tener forma de caja o de cilindro, y está recubierto de material refractario para reducir las pérdidas de calor con el ambiente. El metal se carga al mismo mediante una entrada localizada a los lados del mismo, esta entrada cuenta con una tapa que solo se abre al momento de cargar el horno.

El calor requerido para realizar el proceso de fusión se obtiene a través de quemadores alimentados con gas natural y aire, los cuales transfieren calor a la carga mediante la reacción de combustión correspondiente. La transferencia de calor dentro del horno se lleva a cabo mediante convección y radiación. La radiación es muy importante al ser un reactor prácticamente cerrado, solo cuenta con una pequeña campana para retirar los gases productos de la combustión.

El horno nunca se vacía de metal fundido, siempre cuenta con una cantidad suficiente para que la fusión del metal sólido que se cargue al mismo sea rápida. En la parte baja del horno tiene un tapón, el cual se retira para vaciar parcialmente el horno. Dado que nunca deja de entrar y salir metal completamente, se trata de un reactor semi-continuo, por lo que se puede tratar como un proceso continuo para realizar balances energéticos dentro del mismo. [1] Un esquema típico de un horno de reverbero para la fusión de Al se presenta en la Figura 1.

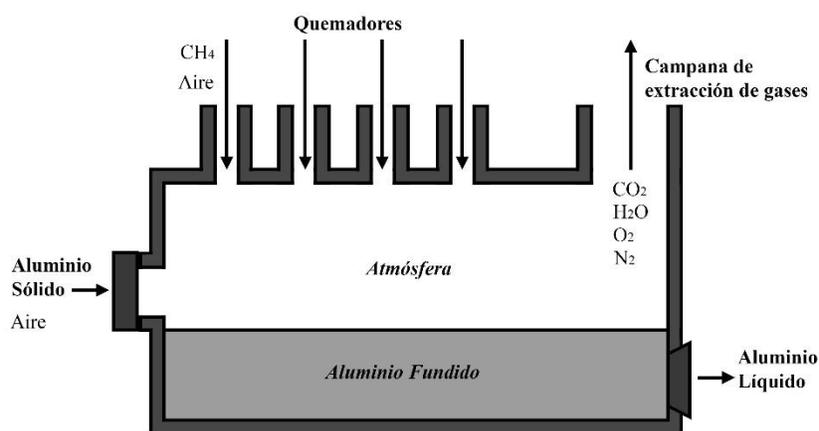


Figura 1.- Esquema de un horno de reverbero para la fusión de Al.

[1] Li, T., Hassan, M., Kuwana, K., Saito, K., & King, P. (2006). Performance of secondary aluminum melting: Thermodynamic analysis and plant-site experiments. *Energy*, 31(12), 1769-1779.

Ejemplo de balance energético en un horno de reverbero:

Considere un horno de reverbero que utiliza quemadores para fundir de manera continua lingotes de aluminio, tal como se observa en la Figura 2. Nótese que se ha considerado un solo quemador, en lugar de un conjunto de quemadores, esto ayuda a realizar el balance más fácilmente, pero hay que considerar este único quemador como la suma del resto de los quemadores pequeños (en este caso solo se considerará metano y aire). Considerando los datos que se presentan en la Figura 2:

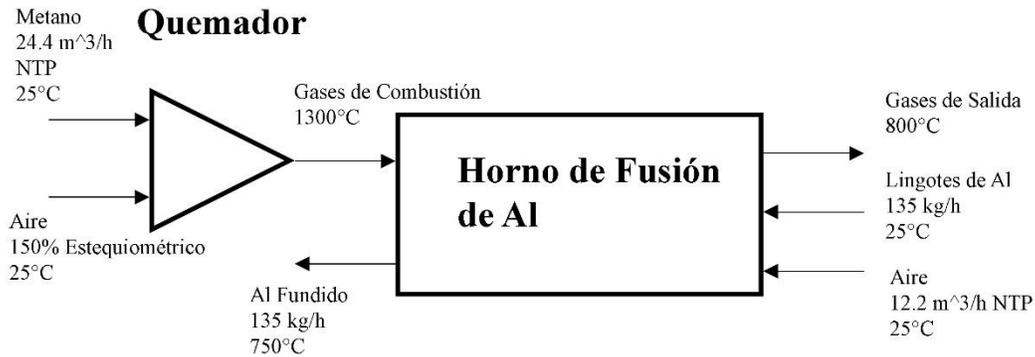


Figura 2.- Esquema del proceso de fusión mediante horno de reverbero.

Con la información presentada en la Figura 2 y la Tabla 1:

- Realice un balance de materia para el sistema.
- Una vez obtenido el balance de materia, calcule las pérdidas de calor del proceso (tanto en el quemador como en el horno de fusión) mediante un balance de energía.
- Realice el diagrama de Sankey del quemador y el horno de fusión.
- Calcule además, la eficiencia energética del horno de fusión por medio de la siguiente ecuación:

$$Ef = \frac{|Energía\ efectiva\ utilizada\ en\ el\ proceso|}{Total\ de\ energía\ suministrada\ al\ proceso} \times 100\%$$

Tabla 1.- Datos termodinámicos de las especies presentes en el horno esquematizado en la Figura 2.

Material	ΔH^0 a 25°C (Kcal/mol)	M (g/mol)	C_p (T(K)) (cal/molK)	Limites (K)
O ₂ (g)	0.00	31.998	$7.16 + 0.001T - 40000T^{-2}$	298 – 3000
N ₂ (g)	0.00	28.014	$6.66 + 0.00102T$	298 – 2500
CO ₂ (g)	-94.05	44.009	$10.55 + 0.00216T - 204000T^{-2}$	298 – 2500
H ₂ O (g)	-57.80	18.015	$7.17 + 0.00256T + 8000T^{-2}$	298 – 2500
CH ₄ (g)	-17.89	16.043	$3.3772 + 0.018T - 0.000004T^2$	298 – 1500
Al (s)	0.0	26.982	$4.94 + 0.00296T$	298 – T _{f, Al}
Al (l)	0.0	26.982	7.6	T _{f, Al} – 2400

$$\lambda_{f, Al} = 2500 \text{ cal/mol}$$

$$T_{f, Al} = 660 \text{ °C}$$

a) Realizar un balance de materia para el sistema

En este caso el balance de materia no está acoplado con el balance de energía del sistema, y dado que no se consideran reacciones químicas con el aluminio, únicamente hay que centrarse en la fase gaseosa del sistema.

Para realizar el balance macroscópico de materia, se comienza calculando los términos fuente de la reacción de combustión y calcular el exceso de aire con respecto a la cantidad estequiométrica requerida, con lo cual se pueden calcular el flujo y la composición de los gases producto de la combustión, los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Flujo molar y composición química de los gases productos de la combustión.

Especie	\dot{n}_i [kg mol/h]	X_i [kg mol i/kg mol]	%
N ₂	11.2857	0.7383	73.83
O ₂	1.0000	0.0654	6.54
H ₂ O	2.0000	0.1308	13.08
CO ₂	1.0000	0.0654	6.54
Total	15.2857	1.0000	100.00

Una vez obtenidos los gases productos de la combustión, se puede calcular el flujo molar y la composición de los gases en la campana de extracción del horno, en este caso basta con sumar los gases de combustión y el aire que entra el horno para obtener los gases de salida. El aire que entra al horno se debe a la apertura del mismo cuando es necesario cargar más aluminio sólido. Los resultados del balance de materia se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Flujo molar y composición química de los gases a la salida del horno.

Especie	\dot{n}_i [kg mol/h]	X_i [kg mol i/kg mol]	%
N ₂	11.6807	0.7400	74.00
O ₂	1.1050	0.0700	7.00
H ₂ O	2.0000	0.1267	12.67
CO ₂	1.0000	0.0633	6.33
Total	15.7857	1.0000	100.00

Una vez obtenido el balance de materia nos conviene obtener un Cp de mezcla, tanto para los gases productos de la combustión como para los gases a la salida del horno:

$$Cp_{Mezcla GC} = 7.013925 + 0.001295 T - 14915.9 T^{-2} \left[\frac{kcal}{kg mol GC K} \right]$$

$$Cp_{Mezcla GS} = 7.006041 + 0.001286 T - 14709.5 T^{-2} \left[\frac{kcal}{kg mol GS K} \right]$$

- b) Una vez obtenido el balance de materia, calcule las pérdidas de calor del proceso (tanto en el quemador como en el horno de fusión) mediante un balance de energía.

Comencemos con el balance para el quemador, el cual se plantea en la Figura 3:

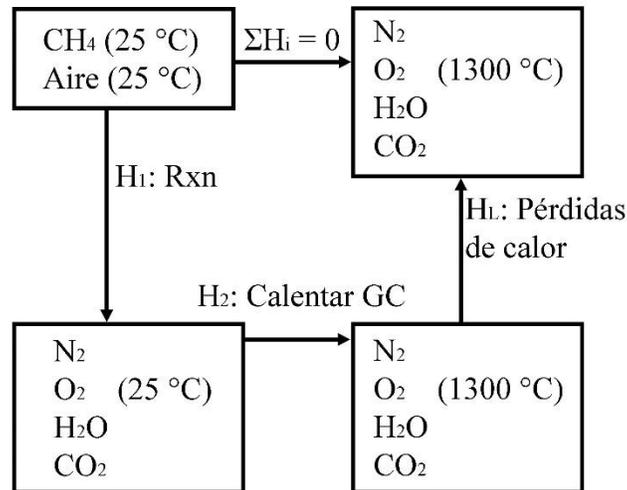


Figura 3.- Balance de calor planteado para el quemador (ver Figura 2).

Una vez planteado el balance procedemos al cálculo de los calores requeridos para el balance.

H_1 : Calor de reacción de combustión:

$$H_1 = - \left(\sum \dot{n}_i \Delta H_{Formación, Productos}^0 - \sum \dot{n}_i \Delta H_{Formación, Reactivos}^0 \right)$$

$$H_1 = 191760.0 \frac{kcal}{h}$$

H_2 : Calor sensible de los gases de combustión:

$$H_2 = -\dot{n}_{GC} \int_{298.15}^{1573.15} C_{p_{Mezcla GC}} dT$$

$$H_2 = -159686.9 \frac{kcal}{h}$$

H_L : Pérdidas de calor

Las pérdidas de calor se obtendrán del balance de energía.

$$H_1 + H_2 + H_L = 0$$

$$H_L = -32073.1 \frac{kcal}{h}$$

La Tabla 4 presenta los resultados del balance de calor para el quemador:

Tabla 4.- Resultados del balance de calor para el quemador.

Fuente de calor	Calor (kcal/h)	Calor (%)
Entradas		
H ₁	191760.0	100.00
Total de entradas	191760.0	100.00
Salidas		
H ₂	-159686.9	83.27
H _L	-32073.1	16.73
Total de salidas	-191760.0	100.00

Una vez verificado el balance de energía para el quemador, se procede a plantear el balance de energía para el horno de reverbero, la Figura 4 presenta el planteamiento del mismo.

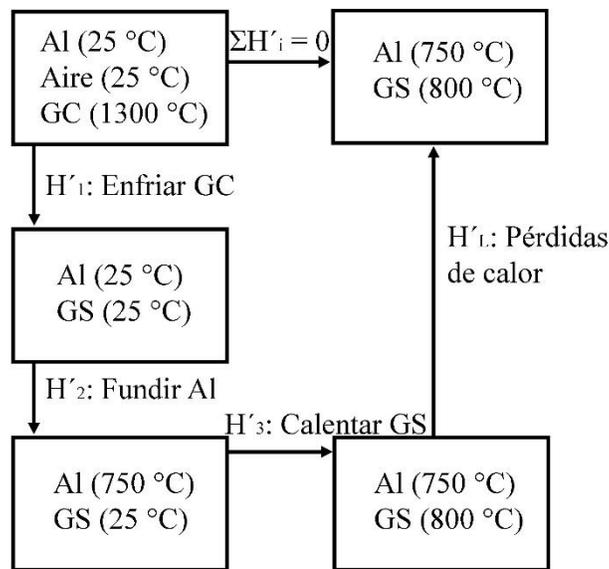


Figura 4.- Balance de calor planteado para el horno de reverbero (ver Figura 2).

H'₁: Calor sensible de los gases de combustión:

Nótese que H'₁ es el opuesto del H₂, dado que el cálculo únicamente invierte los límites de integración.

$$H'_1 = -\dot{n}_{GC} \int_{1573.15}^{298.15} C_{p_{Mezcla\ GC}} dT = -H_2$$

$$H'_1 = 159686.9 \frac{kcal}{h}$$

H'_2 : Fundir aluminio:

El cálculo del calor necesario para fundir el aluminio involucra el calor sensible del sólido, la fusión y el calor sensible del aluminio líquido.

$$H'_2 = -\dot{n}_{Al} \left[\int_{298.15}^{933.15} C_{p_{Al(s)}} dT + \lambda_{Fus Al} + \int_{933.15}^{1023.15} C_{p_{Al(l)}} dT \right]$$

$$H'_2 = -37415.3 \frac{kcal}{h}$$

H'_3 : Calor sensible de los gases a la salida del reactor:

$$H'_3 = -\dot{n}_{GS} \int_{298.15}^{1073.15} C_{p_{Mezcla GS}} dT$$

$$H'_3 = -95935.6 \frac{kcal}{h}$$

H'_L : Pérdidas de calor

Nuevamente las pérdidas de calor se obtendrán del balance de energía.

$$H'_1 + H'_2 + H'_3 + H'_L = 0$$

$$H'_L = -26335.9 \frac{kcal}{h}$$

La Tabla 5 presenta los resultados del balance de energía para el horno de reverbero.

Tabla 5.- Resultados del balance de calor para el horno de reverbero.

Fuente de calor	Calor (kcal/h)	Calor (%)
Entradas		
H'_1	159686.9	100.00
Total de entradas	159686.9	100.00
Salidas		
H'_2	-37415.3	23.43
H'_3	-95935.6	60.08
H'_L	-26335.9	16.49
Total de salidas	-159686.9	100.00

c) Realice el diagrama de Sankey del quemador y el horno de fusión.

Con los resultados de las Tablas 4 y 5 se puede trazar el diagrama de Sankey, el cual se presenta en la Figura 5. El balance de energía térmica considerando el sistema completo se presenta en la Tabla 6, en este caso solo se cuenta con una entrada de energía térmica (la combustión del metano), y en las salidas, además de las que posee el horno, hay que considerar las pérdidas de calor del quemador.

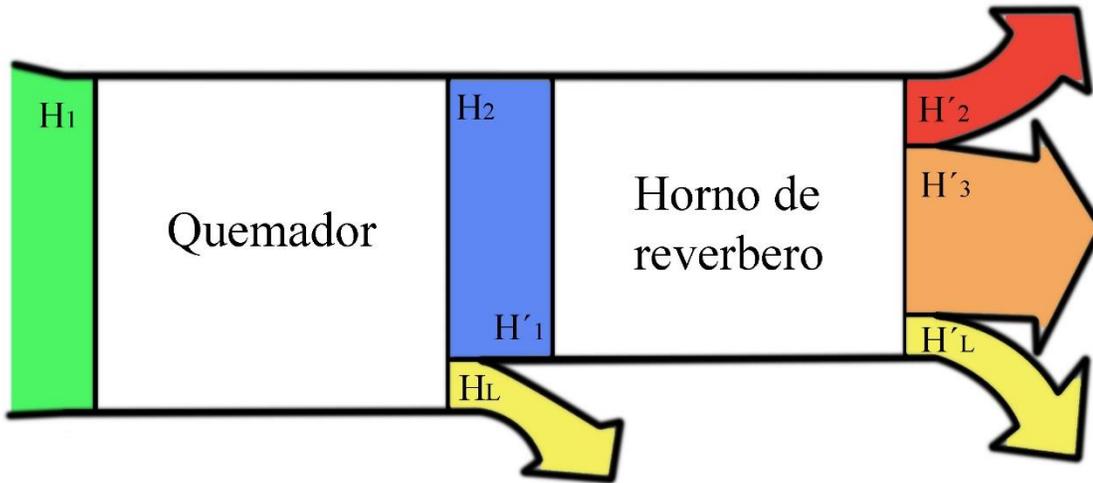


Figura 5.- Diagrama de Sankey del sistema Quemador-Horno de reverbero (ver Figura 2).

Tabla 6.- Balance de energía térmica para el sistema presentado en la Figura 2.

Fuente de calor	Calor (kcal/h)	Calor (%)
Entradas		
H_1	191760.0	100.00
Total de entradas	191760.0	100.00
Salidas		
H_L	-32073.1	16.73
H'_2	-37415.3	19.51
H'_3	-95935.6	50.03
H'_L	-26335.9	13.73
Total de salidas	-191760.0	100.00

d) Calcule además, la eficiencia energética del horno de fusión por medio de la siguiente ecuación:

$$Ef = \frac{\text{Energía efectiva utilizada en el proceso}}{\text{Total de energía suministrada al proceso}} \times 100\%$$

La eficiencia del proceso se calcula considerando la energía efectiva para el proceso, en este caso nuestro interés debe centrarse en obtener aluminio fundido, por lo que la energía efectiva es H'_2 , es decir, el calor necesario para fundir el aluminio.

Para el cálculo podemos considerar solo el horno de reverbero, en cuyo caso la única entrada de energía es el calor que proviene del quemador sin considerar pérdidas:

$$Ef = \frac{\left| -37415.3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right|}{159686.9 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}} \times 100\% = 23.43 \%$$

También la podemos calcular la eficiencia considerando todo el proceso, que es una mejor práctica, en cuyo caso debe considerarse la totalidad del calor de la combustión del metano:

$$Ef = \frac{\left| -37415.3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right|}{191760.0 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}} \times 100\% = 19.51 \%$$

Cualquiera que sea la forma de calcular la eficiencia energética podemos observar que no es muy alta, permaneciendo cerca del 20%.

Para incrementar la eficiencia del proceso podemos apoyarnos del diagrama de Sankey (Figura 5), este instrumento nos permite visualizar el comportamiento de la energía térmica dentro del sistema y analizar cómo mejorar el funcionamiento del mismo.

Centrando nuestra atención en las salidas de calor, es muy claro que la mayor parte de la energía térmica que abandona el proceso es el calor que conservan los gases que salen del horno, por ello nuestra atención debe centrarse en reducir H'_3 o bien en aprovechar este calor en el proceso de fusión.

Una opción es disminuir la cantidad de gases en el horno, con el fin de evitar que estos absorban demasiado calor del horno.

Por otra parte, las pérdidas de calor también pueden intentar reducirse aislando el horno en mayor medida, pero al no ser la mayor salida, el incrementar el aislamiento no será tan efectivo en mejorar la eficiencia.

Se puede pensar también en agregar alguna otra fuente de calor, pero debe ser una fuente de energía que se pueda aprovechar en el proceso de fusión y que no afecte negativamente la eficiencia energética.

¿Cómo podrían mejorar la eficiencia energética del proceso? ¿Qué modificaciones le haría al mismo para incrementar la producción de aluminio?

Exploremos algunas de las opciones previamente mencionadas, para ello supondremos que las pérdidas de calor previamente calculadas se conservarán y que el exceso de calor irá directamente a la fusión del aluminio. Como criterios para evaluar la efectividad de las medidas tomadas, se considerará la eficiencia energética, pero también el porcentaje de producción, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$Prod = \frac{\text{Flujo másico producido bajo las nuevas condiciones}}{\text{Flujo másico producido originalmente}} \times 100\%$$

1.- La primera modificación que se propone es incrementar el aislamiento térmico del horno, con lo que las pérdidas de calor en el mismo se reducirán en un 25%, es decir, pasarán de ser -26335.9 kcal/h a ser -19752.0 kcal/h. La diferencia de calor se redirigirá directamente a la fusión de aluminio, con lo que H'_2 se verá incrementado en magnitud. Supongamos que la temperatura a la que el aluminio abandona el horno no se ve modificada y que únicamente cambia el flujo másico (o molar) del mismo.

Una vez planteada la modificación se procede a calcular el nuevo balance de energía térmica del sistema, en este caso la modificación es directamente sobre el horno de fusión y basándonos en las suposiciones el cambio en H'_L solo modificará H'_2 , por lo que el balance queda de la siguiente manera:

$$H'_1 + H'_2 + H'_3 + H'_L = 0$$

$$H'_2 = -43999.3 \frac{kcal}{h}$$

Recordemos que H'_2 está definida como:

$$H'_2 = -\dot{n}_{Al} \left[\int_{298.15}^{933.15} C_{p_{Al(s)}} dT + \lambda_{Fus Al} + \int_{933.15}^{1023.15} C_{p_{Al(l)}} dT \right]$$

Dado que la temperatura a la que sale el aluminio fundido no cambia, el incremento en calor se verá reflejado en la cantidad de aluminio producido directamente, por lo que:

$$H'_2 = -\dot{n}_{Al} \left[7478.0757 \frac{kcal}{kg mol Al} \right] = -43999.3 \frac{kcal}{h}$$

$$\dot{n}_{Al} = 5.88 \frac{kg mol Al}{h}$$

$$\dot{m}_{Al} = 158.76 \frac{kg Al}{h}$$

Dado que solo se modificó el valor de H'_2 y H'_L y ambos calores corresponden a salidas del proceso no se requieren hacer mayores cálculos para el sistema. El balance de energía para el sistema con la primera modificación se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7.- Balance de energía térmica para el sistema considerando la primera modificación.

Fuente de calor	Calor (kcal/h)	Calor (%)
Entradas		
H ₁	191760.0	100.00
Total de entradas	191760.0	100.00
Salidas		
H _L	-32073.1	16.73
H' ₂	-43999.3	22.94
H' ₃	-95935.6	50.03
H' _L	-19752.0	10.30
Total de salidas	-191760.0	100.00

El diagrama de Sankey del proceso tampoco sufre modificaciones grandes (ver Figura 6) debido a que solo se modifican la proporción de calores en la salida del horno.

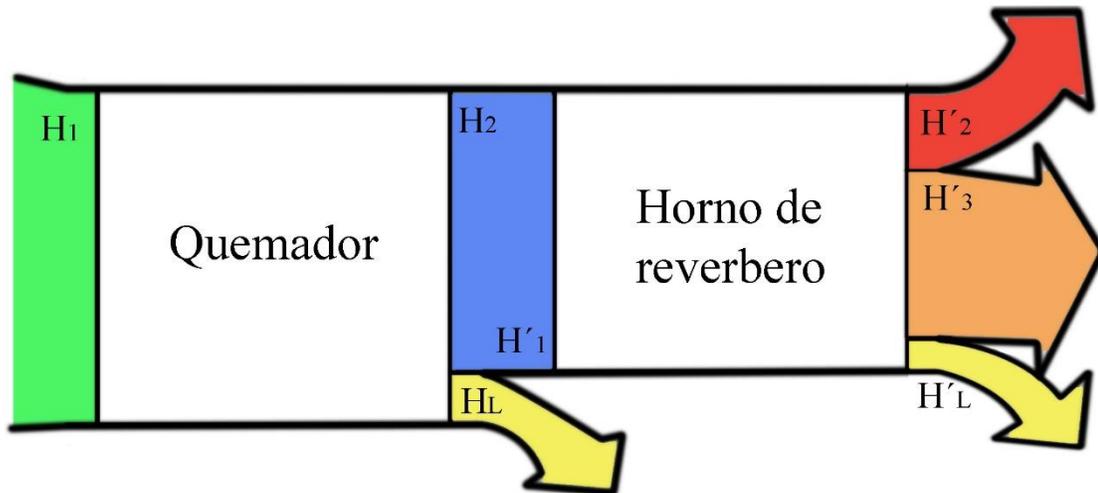


Figura 6.- Diagrama de Sankey del sistema Quemador-Horno de reverbero considerando la primera modificación.

Finalmente para evaluar el efecto de esta modificación vamos a calcular la eficiencia energética y el porcentaje de producción:

$$Ef = \frac{\left| -43999.3 \frac{kcal}{h} \right|}{191760.0 \frac{kcal}{h}} \times 100\% = 22.94\%$$

$$Prod = \frac{158.76 \frac{kg Al}{h}}{135.00 \frac{kg Al}{h}} \times 100\% = 117.60\%$$

Dados los resultados, reducir en 25 % las pérdidas de calor en el horno de reverbero implica un incremento de 17.60 % tanto en la eficiencia energética como en el porcentaje de producción.

2.- Como una segunda modificación se decidió reducir el exceso de aire estequiométrico, pasando de ser 150 % a 130 %. Supongamos que las pérdidas de calor se conservan, tanto para el quemador como para el horno de fusión.

Cuando se realiza esta modificación, cambia el balance de materia en el sistema, específicamente cambia el flujo molar y la composición tanto de los gases productos de la combustión como de los gases que abandonan el horno, los resultados del balance se presentan en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8.- Flujo molar y composición química de los gases productos de la combustión tras la segunda modificación.

Especie	\dot{n}_i [kg mol/h]	X_i [kg mol i/kg mol]	%
N ₂	9.7810	0.7310	73.10
O ₂	0.6000	0.0448	4.48
H ₂ O	2.0000	0.1495	14.95
CO ₂	1.0000	0.0747	7.47
Total	13.3810	1.0000	100.00

Tabla 9.- Flujo molar y composición química de los gases a la salida del horno tras la segunda modificación.

Especie	\dot{n}_i [kg mol/h]	X_i [kg mol i/kg mol]	%
N ₂	10.1760	0.7331	73.31
O ₂	0.7050	0.0508	5.08
H ₂ O	2.0000	0.1441	14.41
CO ₂	1.0000	0.0720	7.20
Total	13.8810	1.0000	100.00

Con lo cual también se ven modificados los Cp de mezcla tanto de los gases productos de combustión, como de la mezcla de gases a la salida del horno.

$$Cp_{Mezcla GC} = 7.049359 + 0.001334 T - 15843.4 T^{-2} \left[\frac{kcal}{kg mol GC K} \right]$$

$$Cp_{Mezcla GS} = 7.039117 + 0.001323 T - 15575.3 T^{-2} \left[\frac{kcal}{kg mol GS K} \right]$$

Dado que las pérdidas de calor se conservan el balance de energía en el quemador no sufre modificaciones en cuanto a los valores de H₁, H₂ o H_L. No obstante, las condiciones para que H₂ mantenga esa cantidad de calor se ven modificadas, mientras que H₁ permanece igual dado que el cálculo ya se realizaba considerando que la combustión se realizaba de manera estequiométrica.

Dado que el número de moles y el Cp de mezcla de los gases producto de la combustión se calculan directamente con el balance de materia, esto implica un cambio en la temperatura alcanzada por la combustión:

H₂: Calor sensible de los gases de combustión:

$$H_2 = -\dot{n}_{GC} \int_{298.15}^{Tf} C_{p_{Mezcla\ GC}} dT = -159686.9 \frac{kcal}{h}$$

$$H_2 = - \left(13.3810 \frac{kg\ mol}{h} \right) \int_{298.15}^{Tf} \left[7.049359 + 0.001334 T - 15843.4 T^{-2} \right] \left[\frac{kcal}{kg\ mol\ GS\ K} \right] dT$$

$$H_2 = -94.3271(Tf - 298.15) - 0.00893(Tf^2 - 298.15^2) - 212000 \left(\frac{1}{Tf} - \frac{1}{298.15} \right)$$

$$H_2 = -0.00893 Tf^2 - 94.3271 Tf - 212000 \frac{1}{Tf} + 29628.36 \frac{kcal}{h} = -159686.9 \frac{kcal}{h}$$

De aquí podemos obtener la siguiente ecuación para obtener el valor de Tf:

$$-0.00893 Tf^2 - 94.3271 Tf + 189315.2 \frac{kcal}{h} - 212000 \frac{1}{Tf} = 0$$

Si multiplicamos ambos lados por Tf, se conserva la igualdad:

$$-0.00893 Tf^3 - 94.3271 Tf^2 + 189315.2 Tf - 212000 = 0$$

Esta ecuación posee dos raíces negativas y una positiva, por lo que la temperatura de flama corresponde a la raíz positiva:

$$Tf = 1724.28\ K$$

$$Tf = 1451.14\ ^\circ C$$

Con esta temperatura ya conocemos los nuevos parámetros sobre los que operará el quemador tras la modificación.

Nota: recuerden que para obtener el valor de H₂ se debe sustituir el valor obtenido en la expresión antes de multiplicar por Tf ambos lados de la ecuación, ya que a pesar de que se conserva la igualdad, la magnitud de los valores si se ve modificada.

En el caso del horno de reverbero es importante que se conserven las temperaturas de salida tanto del aluminio fundido como de los gases que abandonan el mismo, principalmente porque a temperaturas mayores se incrementa la oxidación del metal fundido, debido a eso recalcularemos H'_2 y H'_3 ya que H'_1 y H'_L se conservan. En cuanto H'_3 poseemos todos los datos necesarios para calcular su valor, ya que proviene del balance de los gases en el horno, en el caso de H'_2 obtendremos el valor a partir de balance de energía y luego calcularemos el valor del nuevo flujo de aluminio fundido.

H'_3 : Calor sensible de los gases a la salida del reactor:

$$H'_3 = -\dot{n}_{GS} \int_{298.15}^{1073.15} C_{p_{Mezcla\ GS}} dT$$

$$H'_3 = -84959.8 \frac{kcal}{h}$$

H'_2 : Fundir aluminio:

$$H'_1 + H'_2 + H'_3 + H'_L = 0$$

$$H'_2 = -48391.1 \frac{kcal}{h}$$

Por lo que al realizar el mismo cálculo que se hizo en la primera modificación se llega a:

$$H'_2 = \dot{n}_{Al} \left[-7478.0757 \frac{kcal}{kg\ mol\ Al} \right] = -48391.1 \frac{kcal}{h}$$

$$\dot{n}_{Al} = 6.47 \frac{kg\ mol\ Al}{h}$$

$$\dot{m}_{Al} = 174.60 \frac{kg\ Al}{h}$$

Los resultados del balance energético se presentan en la Tabla 10, el diagrama de Sankey correspondiente se presenta en la Figura 7.

Tabla 10.- Balance de energía térmica para el sistema considerando la segunda modificación.

Fuente de calor	Calor (kcal/h)	Calor (%)
Entradas		
H_1	191760.0	100.00
Total de entradas	191760.0	100.00
Salidas		
H_L	-32073.1	16.73
H'_2	-48391.1	25.24
H'_3	-84959.8	44.31
H'_L	-26335.9	13.73
Total de salidas	-191760.0	100.00

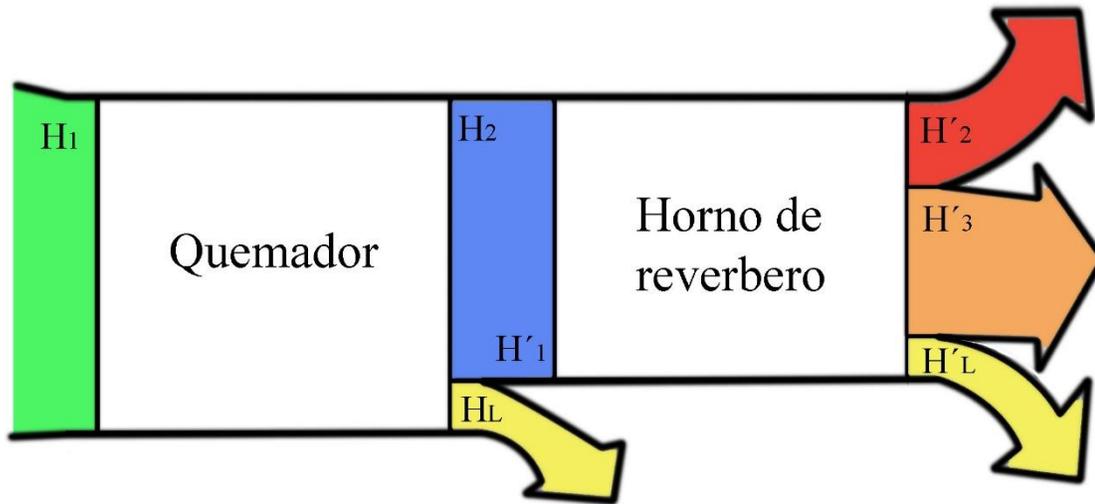


Figura 7.- Diagrama de Sankey del sistema Quemador-Horno de reverbero considerando la segunda modificación.

Nuevamente el diagrama de Sankey (ver Figura 7) no sufre modificaciones importantes, en este caso se reduce un poco el tamaño de H'_3 , mientras que H'_2 se incrementa.

Finalmente calculamos la eficiencia energética y el porcentaje de producción tras esta modificación:

$$Ef = \frac{\left| -48391.1 \frac{kcal}{h} \right|}{191760.0 \frac{kcal}{h}} \times 100\% = 25.24 \%$$

$$Prod = \frac{174.60 \frac{kg Al}{h}}{135.00 \frac{kg Al}{h}} \times 100\% = 129.34\%$$

Por lo que reducir el exceso de aire de 150 % a 130 % produce un incremento del 29.34 % tanto en la eficiencia energética como en el porcentaje de producción, comparando con la producción original de 135.00 kg de aluminio por hora y la eficiencia energética original que era del 19.51 %.

Se puede explorar más profundamente el efecto del exceso de aire sobre el comportamiento del sistema, para ello variaremos el exceso de aire entre 170% y 130%, siendo el caso con 150 % el que consideraremos como base.

Primeramente la Figura 8 muestra el efecto del % de exceso sobre la temperatura de los gases de combustión, se observa que a mayor exceso la temperatura disminuye, lo que puede ayudar a controlar la producción de óxidos nitrosos debido al exceso de temperatura en los quemadores.

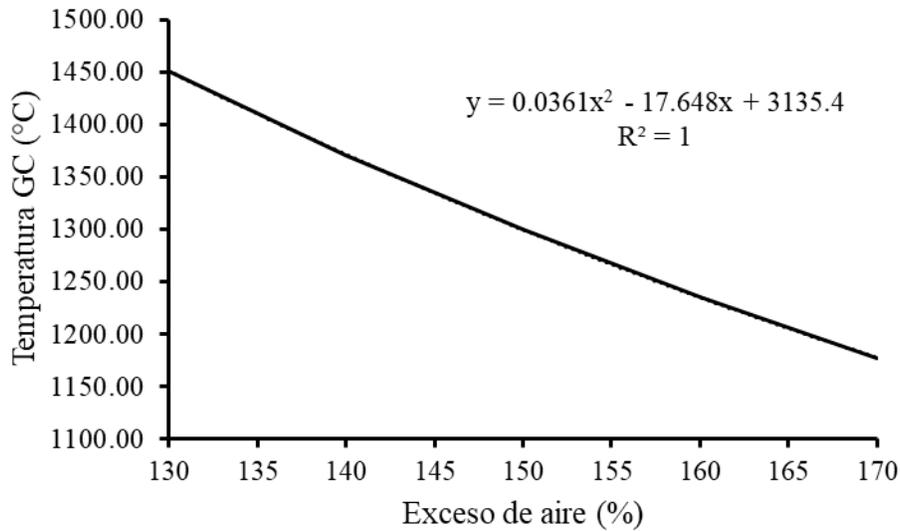


Figura 8.- Efecto del exceso de aire sobre la temperatura que alcanzan los gases de combustión en el quemador.

La Figura 9 presenta el efecto sobre el flujo másico de aluminio suponiendo que se conservan las temperaturas del aluminio fundido y de los gases que abandonan el horno en el horno de reverbero. Obsérvese que entre menos aire en exceso se ingrese, mayor calor puede ser empleado en la fusión de aluminio, sin embargo, hay que tener cuidado de que la combustión del metano continúe siendo completa.

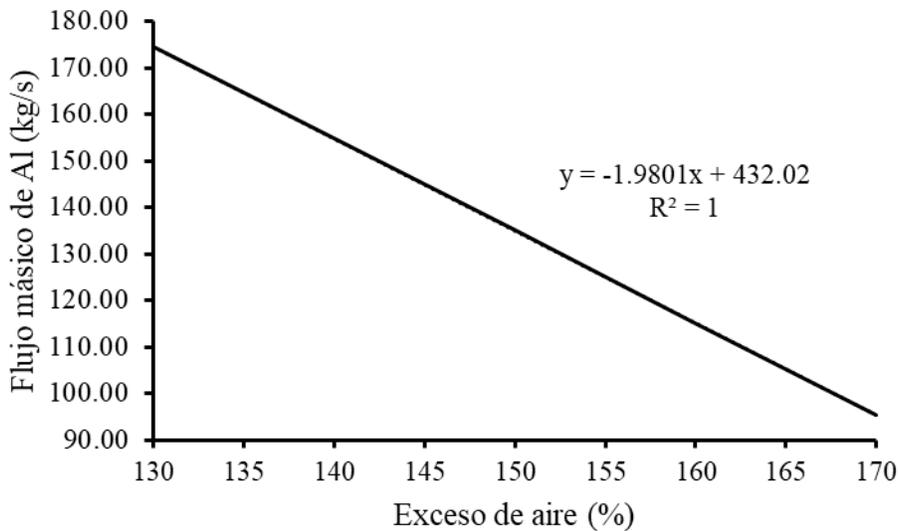


Figura 9.- Efecto del exceso de aire sobre el flujo másico de aluminio fundido producido.

Finalmente las Figuras 10 y 11, presentan el efecto del exceso de aire tanto en el porcentaje de producción como en la eficiencia energética. A pesar de que aparentemente es mucho mejor trabajar siempre con excesos de aire bajos, hay que considerar que se debe cuidar que la combustión de los gases sea completa, no entraremos en detalles en el presente escrito, pero la combustión depende de muchos factores como la velocidad a la que se inyectan tanto el combustible como el comburente al quemador, la relación aire : combustible, el diseño del quemador y la cámara en la que se colocará el mismo, entre otros muchos parámetros de operación y diseño, por lo que realizar variaciones grandes en los parámetros de operación deben considerar otros factores.

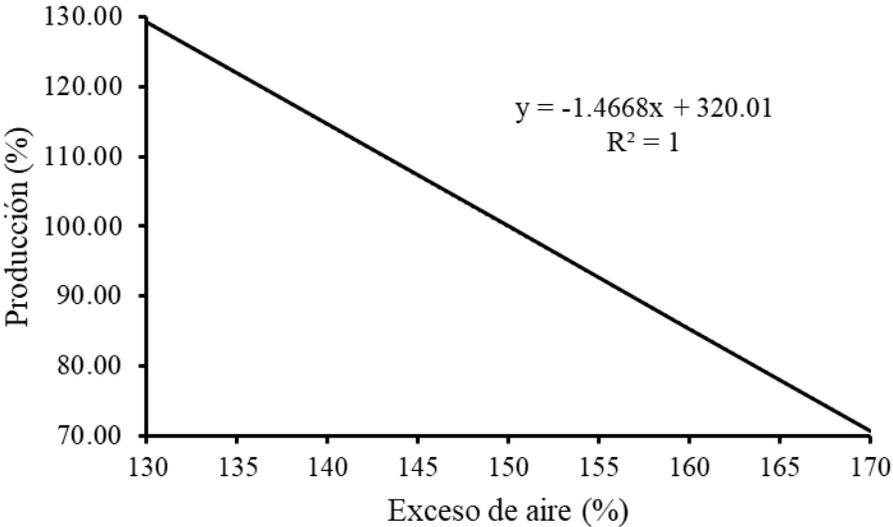


Figura 10.- Efecto del exceso de aire sobre el porcentaje de producción.

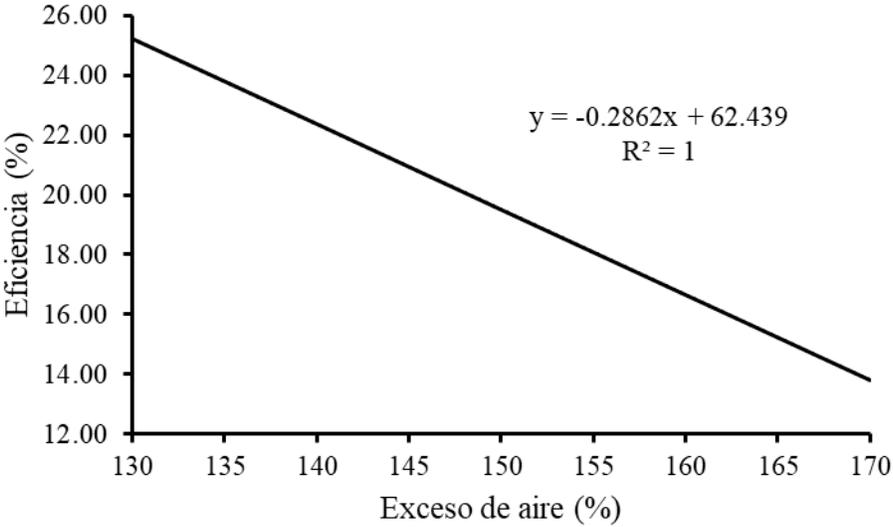


Figura 11.- Efecto del exceso de aire sobre la eficiencia energética.

3.- La tercera modificación es agregar un intercambiador de calor para aprovechar que los gases que abandonan el horno se encuentran a una temperatura elevada, y por lo tanto es una gran cantidad de calor que se puede aprovechar. Al acoplar el intercambiador al proceso, el esquema del mismo queda de la siguiente manera (ver Figura 12):

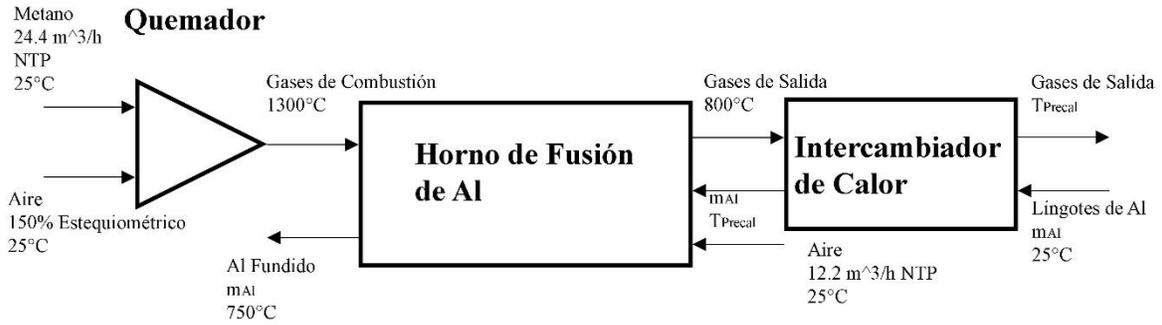


Figura 12.- Proceso de fusión de aluminio con un intercambiador de calor.

En este caso el intercambiador se emplea para precalentar los lingotes de aluminio que se cargarán al horno. Supongamos que el tiempo que permanecen en el mismo los lingotes es el suficiente para que se establezca un equilibrio térmico, es decir, los lingotes y los gases abandonan el intercambiador a la misma temperatura. Nótese que el aire que entra con los lingotes al horno no se precalienta, esto es porque los lingotes precalentados no se añaden directamente del intercambiador por lo que arrastran aire de la atmósfera al abrir la puerta del horno, consideremos que este aire permanece a 25°C. Supongamos que las pérdidas de calor en el intercambiador son del 10 % de todo el calor entrante al mismo. Dentro de las suposiciones podemos considerar que se mantienen las pérdidas de calor en el quemador y el horno de reverbero.

Esta última modificación, si bien no implica cambios en el quemador, implica que se añada un nuevo sistema, el intercambiador de calor, además de que al estar acoplado con el horno de reverbero implica que hay cambios en el mismo, es por ello que hay que replantear el balance en el horno, además de plantear el balance en el intercambiador.

Planteamos el nuevo balance para el horno de reverbero, el cual se presenta en la Figura 13, además de plantear el balance para el intercambiador de calor, el cual se presenta en la Figura 14.

Nótese, en el caso del horno, que se añadió el calor del aluminio tras el precalentamiento (H'_4), el cual corresponde en magnitud al calor que adquiere al aluminio precalentado en el intercambiador (H''_3) pero tiene signo contrario, mientras que el calor que conservan los gases que abandonan el horno (H'_3) es equivalente en magnitud, pero con signo contrario, al calor que entra en el intercambiador como calor sensible de los gases que salen del horno (H''_1), por lo que se debe considerar que ambos sistemas están interconectados por estas fuentes de calor.

Hay que considerar que si bien, se conoce el balance de materia para los gases, no se sabe bien la cantidad de aluminio que se puede procesar bajo las condiciones propuestas por lo que se dejará como incógnita junto con la temperatura a la que se precalientan el aluminio y terminan los gases de salida.

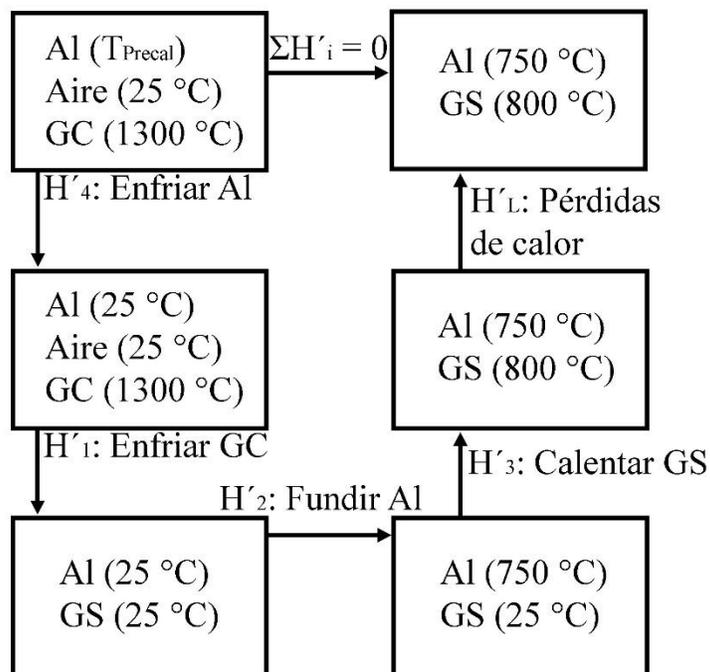


Figura 13.- Balance de calor planteado para el horno de reverbero tras la tercera modificación.

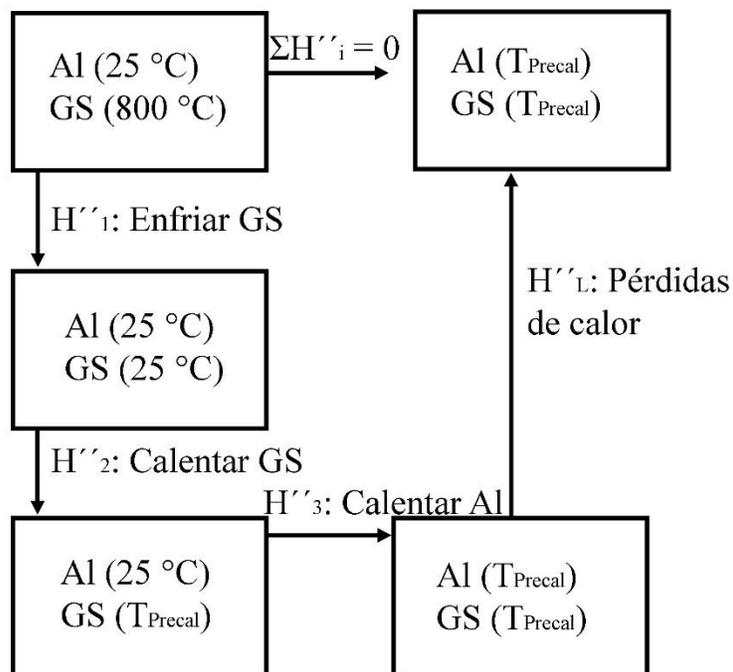


Figura 14.- Balance de calor planteado para el intercambiador de calor, el cual se añade al sistema tras la tercera modificación.

Comencemos con el balance para el horno de reverbero sabiendo que se conservan las pérdidas de calor del caso original.

H₁: Calor sensible de los gases de combustión:

$$H'_1 = -\dot{n}_{GC} \int_{1573.15}^{298.15} C_{p_{Mezcla\ GC}} dT = -H_2$$

$$H'_1 = 159686.9 \frac{kcal}{h}$$

H₂: Fundir aluminio:

$$H'_2 = -\dot{n}_{Al} \left[\int_{298.15}^{933.15} C_{p_{Al(s)}} dT + \lambda_{Fus\ Al} + \int_{933.15}^{1023.15} C_{p_{Al(l)}} dT \right]$$

$$H'_2 = \dot{n}_{Al} \left[-7478.0757 \frac{kcal}{kg\ mol\ Al} \right]$$

H₃: Calor sensible de los gases a la salida del reactor:

$$H'_3 = -\dot{n}_{GS} \int_{298.15}^{1073.15} C_{p_{Mezcla\ GS}} dT$$

$$H'_3 = -95935.6 \frac{kcal}{h}$$

H₄: Calor sensible del precalentamiento del aluminio:

$$H'_4 = -\dot{n}_{Al} \left[\int_{T_{precal}}^{298.15} C_{p_{Al(s)}} dT \right]$$

$$H'_4 = -\dot{n}_{Al} \left[4.94(298.15 - T_{precal})0.00148(298.15^2 - T_{precal}^2) \frac{kcal}{kg\ mol\ Al} \right]$$

$$H'_4 = \dot{n}_{Al} \left[0.00148 T_{precal}^2 + 4.94 T_{precal} - 1604.4232 \frac{kcal}{kg\ mol\ Al} \right]$$

H_L: Pérdidas de calor

$$H'_L = -26335.9 \frac{kcal}{h}$$

Finalmente se realiza el balance de energía térmica:

$$\begin{aligned}
 H'_1 + H'_2 + H'_3 + H'_4 + H'_L &= 0 \\
 159686.9 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} + \dot{n}_{Al} \left[-7478.0757 \frac{\text{kcal}}{\text{kg mol Al}} \right] - 95935.6 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \\
 + \dot{n}_{Al} \left[0.00148 T_{precal}^2 + 4.94 T_{precal} - 1604.4232 \frac{\text{kcal}}{\text{kg mol Al}} \right] \\
 - 26335.9 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} &= 0
 \end{aligned}$$

Quedando la siguiente ecuación:

$$\dot{n}_{Al} \left[0.00148 T_{precal}^2 + 4.94 T_{precal} - 9082.5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg mol Al}} \right] + 37415.3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 0$$

Procedemos a realizar el balance de calor para el intercambiador de calor.

H''_1 : Calor sensible de los gases a la entrada del intercambiador:

$$\begin{aligned}
 H''_1 &= -\dot{n}_{GS} \int_{1073.15}^{298.15} C_{p_{Mezcla GS}} dT = -H'_3 \\
 H''_1 &= 95935.6 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}
 \end{aligned}$$

H''_2 : Calor sensible de los gases a la salida del intercambiador:

$$\begin{aligned}
 H''_2 &= -\dot{n}_{GS} \int_{298.15}^{T_{precal}} C_{p_{Mezcla GS}} dT \\
 H''_2 &= - \left(15.7857 \frac{\text{kg mol GS}}{\text{h}} \right) \int_{298.15}^{T_{precal}} 7.006041 + 0.001286 T \\
 &\quad - 14709.50226 T^{-2} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg mol GS K}} \right] dT \\
 H''_2 &= -110.595(T_{precal} - 298.15) - 0.01015(T_{precal}^2 - 298.15^2) \\
 &\quad - 232200 \left(\frac{1}{T_{precal}} - \frac{1}{298.15} \right) \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \\
 H''_2 &= -0.01015 T_{precal}^2 - 110.595 T_{precal} + 34655.05 - \frac{232200 \text{ kcal}}{T_{precal} \text{ h}}
 \end{aligned}$$

H''_3 : Calor sensible del precalentamiento del aluminio:

$$H''_3 = -H'_4$$

$$H''_3 = \dot{n}_{Al} \left[-0.00148 T_{precal}^2 - 4.94 T_{precal} + 1604.4232 \frac{kcal}{kg \text{ mol Al}} \right]$$

H''_L : Pérdidas de calor

En este caso el problema menciona que en el intercambiador existen 10 % de pérdidas de calor, dado que el único calor que entra al mismo es el calor de los gases a la entrada al intercambiador, las pérdidas de calor se pueden calcular como:

$$H''_L = -0.1 H''_1 = -9593.56 \frac{kcal}{h}$$

Finalmente se realiza el balance de energía térmica:

$$H''_1 + H''_2 + H''_3 + H''_L = 0$$

$$\begin{aligned} 95935.6 \frac{kcal}{h} + \left(-0.01015 T_{precal}^2 - 110.595 T_{precal} + 34655.05 - \frac{232200}{T_{precal}} \right) \frac{kcal}{h} \\ + \dot{n}_{Al} \left[-0.00148 T_{precal}^2 - 4.94 T_{precal} + 1604.4232 \frac{kcal}{kg \text{ mol Al}} \right] \\ - 9593.56 \frac{kcal}{h} = 0 \end{aligned}$$

Quedando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{Al} \left[-0.00148 T_{precal}^2 - 4.94 T_{precal} + 1604.4232 \frac{kcal}{kg \text{ mol Al}} \right] - 0.01015 T_{precal}^2 \\ - 110.595 T_{precal} + 120997.1 - \frac{232200}{T_{precal}} \frac{kcal}{h} = 0 \end{aligned}$$

De ambos balances obtenemos dos ecuaciones con dos incógnitas. Para simplificar un poco la resolución podemos multiplicar ambos términos de la segunda ecuación por T_{precal} , quedando el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{Al} [0.00148 T_{precal}^2 + 4.94 T_{precal} - 9082.5] + 37415.3 = 0 \\ \dot{n}_{Al} [-0.00148 T_{precal}^3 - 4.94 T_{precal}^2 + 1604.4232 T_{precal}] - 0.01015 T_{precal}^3 \\ - 110.595 T_{precal}^2 + 120997.1 T_{precal} - 232200 = 0 \end{aligned}$$

La solución al sistema de ecuaciones obtenido no es trivial, ya que en conjunto existen cinco pares de valores de \dot{n}_{Al} y T_{precal} que pueden satisfacer la igualdad.

La solución del sistema se hizo mediante Matlab con el siguiente código, donde n es el flujo molar del aluminio y t es la temperatura de precalentamiento, los resultados arrojados se presentan en la Tabla 11:

```
clear all;
close all;
clc;
syms n t
eqns = [n*(-9082.4990053+4.94*t+0.00148*t^2)+37415.3222481655==0, n*(1604.4232653*t-4.94*t^2-0.00148*t^3)-232200+120997.08977996*t-110.595357142857*t^2-0.0101496642857143*t^3==0];
S = vpasolve(eqns,[n t])
S.n
S.t
```

Tabla 11.-Raíces del sistema de ecuaciones del balance de calor del horno de reverbero y el intercambiado de calor obtenidas mediante Matlab.

Raíces del par de ecuaciones	$\dot{n}_{Al} \left[\frac{kg \ mol \ Al}{h} \right]$	$T_{precal} [K]$
1	4.1236	1.8230
2	-0.2483	-12191.7918
3	-8.9958	1756.3371
4	60.4669	-4585.0848
5	8.7078	784.4240

Si tomamos en cuenta que ambos, el flujo y la temperatura deben ser positivos y con valores cercanos a los que podría presentar el sistema en la realidad, el quinto par de raíces es el único que físicamente es posible en nuestro sistema, por lo que:

$$\dot{n}_{Al} = 8.7078 \frac{kg \ mol \ Al}{h}$$

$$T_{precal} = 784.42 \ K$$

O bien:

$$\dot{m}_{Al} = 234.95 \frac{kg \ Al}{h}$$

$$T_{precal} = 511.27 \ ^\circ C$$

Los resultados del balance de energía para el sistema quemador-horno-intercambiador se presentan en la Tabla 12. Recuerden que para calcular el valor de cada calor se deben sustituir los valores del flujo molar de aluminio y la temperatura de precalentamiento en las ecuaciones de cada fuente de calor. La Tabla 12 presenta el balance para el sistema completo, pero también se pueden obtener los balances para cada parte del sistema.

Tabla 12.- Balance de energía térmica para el sistema considerando la tercera modificación.

Fuente de calor	Calor (kcal/h)	Calor (%)
Entradas		
H_1	191760.0	100.00
Total de entradas	191760.0	100.00
Salidas		
H_L	-32073.1	16.73
H'_2	-65117.4	33.96
H'_L	-26335.9	13.73
H''_2	-58639.9	30.58
H''_L	-9593.6	5.00
Total de salidas	-191760.0	100.00

Finalmente el diagrama de Sankey del sistema quemador-horno-intercambiador se presenta en la Figura 15. Nótese como se puede ver la interconexión entre los sistemas, teniendo dos conexiones el horno de reverbero con el intercambiador de calor y una conexión extra con el quemador.

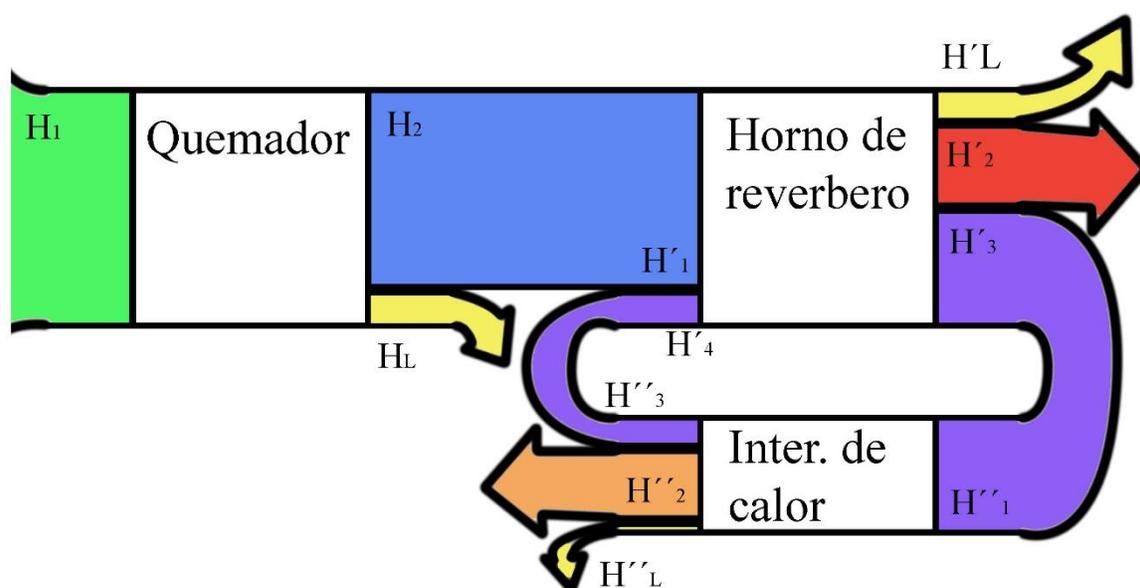


Figura 8.- Diagrama de Sankey del sistema Quemador-Horno de reverbero-Intercambiador de calor considerando la tercera modificación.

Finalicemos calculando la eficiencia energética y el porcentaje de producción:

$$Ef = \frac{\left| -65117.4 \frac{kcal}{h} \right|}{191760.0 \frac{kcal}{h}} \times 100\% = 33.96 \%$$

$$Prod = \frac{234.95 \frac{kg Al}{h}}{135.00 \frac{kg Al}{h}} \times 100\% = 174.04\%$$

Incrementándose la eficiencia energética y el porcentaje de producción en 74.04 % al aprovechar el calor de los gases que abandonan el horno en precalentar el aluminio fundido. Este 74.04 % de incremento se obtiene comparando los nuevos valores con la producción original de 135.00 kg de aluminio por hora y la eficiencia energética original que era del 19.51 %.

Obsérvese que cada modificación afecto al sistema de diferente manera, siendo su efecto sobre la eficiencia energética y el porcentaje de producción cada vez mayor, sin embargo, esto no quiere decir que debamos quedarnos solo con una modificación, se pueden realizar varias, pero hacerlas al mismo tiempo muchas veces involucra riesgos en la producción, por lo que es mejor trabajar el sistema poco a poco para asegurar su correcto funcionamiento y que los cambios sean adecuados.

Cabe señalar que todas las modificaciones se propusieron a partir de la observación del diagrama se Sankey original, es por ello que este tipo de herramienta visual es valiosa para poder mejorar la eficiencia de sistemas que tienen flujos de energía térmica para su funcionamiento. Es pertinente realizar una reflexión final sobre la función de un ingeniero de procesos en el control y optimización de los mismos.

¿Qué otras modificaciones podría realizar al sistema para mejorar más su eficiencia? ¿Sería mejor realizar varias modificaciones simultáneas? ¿Qué problemas surgen si se realizan varias modificaciones simultáneas sin haber probado el efecto de las anteriores?