

Estudio de reducción del consumo de gas natural en horno de calentamiento de palanquillas tipo vigas galopantes

Néstor Fabián Reina ¹, Raúl Daniel López ², Juan Ignacio Tizi ³, Juan Francisco Alfaro ⁴

¹ *Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.
Departamento de Ingeniería Mecánica.*

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina e-mail: nreina@frsn.utn.edu.ar

² *Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.
Departamento de Ingeniería Mecánica.*

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina – e-mail: rdlopez@frsn.utn.edu.ar

³ *Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.
Departamento de Ingeniería Mecánica.*

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina – e-mail: jtizi@frsn.utn.edu.ar

⁴ *Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.
Departamento de Ingeniería Mecánica.*

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina – e-mail: jalfaro@frsn.utn.edu.ar

RESUMEN

La racionalización de aquellos recursos no renovables es, sin duda, uno de los principales desafíos a los que se enfrentan los ingenieros en la actualidad. Cobra más importancia aún, si esta reducción en el uso de los recursos genera menores costos operativos en los procesos, es decir mayores beneficios para las empresas. Esta coyuntura es la que induce a plantear estudios como el presente.

El objetivo de este trabajo fue investigar la posibilidad de aumentar el rendimiento energético, es decir minimizar el consumo de energía, de un horno del tipo vigas galopantes, usado en una empresa de la zona de la ciudad de San Nicolás. Dicho horno se utiliza para el calentamiento de palanquillas de acero, que luego, mediante el proceso de laminación en caliente, se transforman en perfiles de distintos tipos. Posee una capacidad de 33 tn/h para palanquillas de 100 mm x 100 mm x 3000 mm y de 42 tn/h, para palanquillas de 120 mm x 120 mm x 3000 mm.

Mediante el Balance Térmico, se pudo visualizar como se distribuye en todo el proceso de calentamiento de las palanquillas, la energía (calor) desarrollada por los quemadores de la instalación (horno), como así también se individualizaron y cuantificaron las pérdidas.

Una vez desarrollado este estudio, se plantearon distintas alternativas con el fin de minimizar el consumo de combustible utilizado en el proceso.

Palabras claves: horno, gas, energía, palanquillas, calor.

1- INTRODUCCIÓN

El aumento de la eficiencia en los procesos que utilizan recursos no renovables es, sin duda, uno de los desafíos a los que se enfrentan los ingenieros contemporáneos. Más importante aún es, si esta reducción en el uso de los recursos, genera beneficios para las empresas en forma de menores costos operativos en los procesos. Esta coyuntura es la que induce a plantear estudios como el presente.

1.1 - Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo investigar la posibilidad de aumentar el rendimiento energético, es decir minimizar el consumo de energía, de un horno del tipo vigas galopantes, usado en una empresa de la zona de la ciudad de San Nicolás. El mismo se utiliza para el calentamiento de palanquillas de acero, que luego, mediante el proceso de laminación en caliente, se transforman en perfiles de distintos tipos.

Para ello se estudió la manera en que se emplea la energía (calor) en el proceso y, mediante un balance térmico, se propusieron alternativas con el fin de reducir el consumo de energía del mismo.

2- ANÁLISIS

2.1 - Descripción del Proceso

Las palanquillas se trasladan desde el proceso anterior a la operación de calentamiento (tijera de corte), mediante una serie de rodillos, que depositan las mismas en la mesa de entrada del horno.

Un sistema de pistones hidráulicos introduce las palanquillas a la sala del horno, depositándolas sobre la solera del mismo. Desde allí comienza su calentamiento, atravesando la longitud del horno, mediante un sistema de vigas galopantes que posee la solera. Cuando llegan al otro extremo, han alcanzado ya la temperatura necesaria para ser laminadas y son despedidas hacia el tren laminador (etapa posterior al calentamiento) por una serie de rodillos refrigerados por agua, a través de una puerta lateral del tipo guillotina, llamada puerta de deshornamiento.

2.2- Descripción de la instalación

El horno como se dijo anteriormente es del tipo de vigas galopantes. Tiene una longitud total de 14 m y un ancho de 6,75 m. Provee al proceso palanquillas a una temperatura de deshornamiento de 1240 °C (aptas para laminación). El calentamiento se efectúa por medio de quemadores radiantes instalados en la bóveda del horno. El combustible empleado en el Horno es Gas Natural de un **PCI = 9,619 KW/Nm³GN** (información suministrada por la Empresa proveedora de Gas Natural de la Planta).

Posee una capacidad de 33 tn/h para palanquillas de 100 mm x 100 mm x 3000 mm y de 42 tn/h, para palanquillas de 120 mm x 120 mm x 3000 mm.

Desde el punto de vista térmico, el horno está dividido en tres zonas. Cada zona se distingue por la cantidad de calentadores que posee, entregando la primer zona, llamada zona de *precalentamiento*, un 48% de la energía total; la segunda zona o de *calentamiento*, un 43%; y la tercera, llamada zona de *igualación*, un 9%.

Los humos son recogidos sobre la puerta de carga por un colector y conducidos a través de un ducto aéreo hasta la chimenea por donde son expulsados al exterior.

Las vigas galopantes poseen un sistema de cierre de agua (llamado cierre hidráulico). Éste aísla completamente el laboratorio del horno con el sótano, con lo que se evita que los gases calientes desciendan a ese sitio; o que, por el contrario, se introduzca aire falso al horno.

La estructura metálica del horno está construida con perfiles de acero y acorazada mediante chapas del mismo material.

El horno se halla revestido interiormente por masas plásticas refractarias de alto contenido de alúmina, ladrillos de hormigón refractario y placas aislantes.

2.3 – El Horno y su intercambio de energía calórica

El calor se distribuye en el horno como está indicado en los siguientes ítems de la Figura 1.

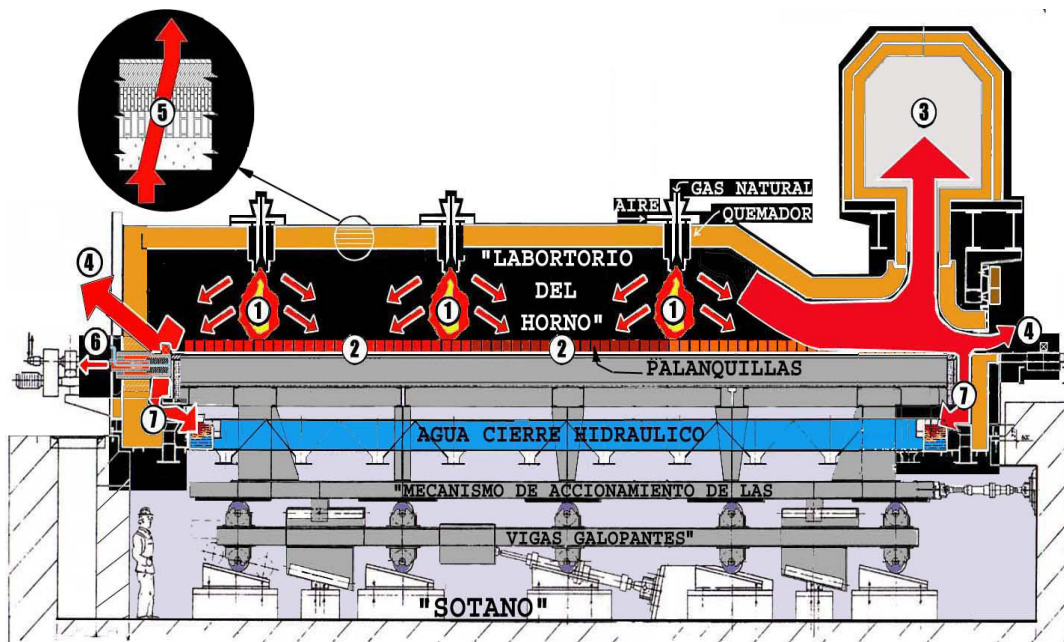


Figura 1 - El horno y su flujo de calor

- 1.- Calor *generado* por combustible.
- 2.- Calor *extraído* por palanquillas (acero).
- 3.- Calor *extraído* por los gases de combustión.
- 4.- Calor *extraído* en las puertas.
- 5.- Calor *extraído* por los muros.
- 6.- Calor *extraído* por refrigeración de los rodillos deshornadores.
- 7.- Calor *extraído* por el cierre hidráulico.

2.4 – Desarrollo

El estudio se desarrolla de la siguiente manera:

- **Estudio de la situación actual de funcionamiento del proceso.** Esto comprende la realización de un balance térmico y cálculo del rendimiento energético del mismo.
- **Propuestas de mejoras en el proceso.** Esto es, por una parte visualizar las mejoras en cuanto al rendimiento energético, obtenidas por una parte, a partir de la reparación de la puerta de carga del horno y por otra parte mediante la implementación de un proceso de precalentamiento del aire de combustión para los quemadores.

En ambos casos, los cálculos se realizaron a partir de datos recopilados del funcionamiento real del proceso (temperaturas, caudales, presiones, etc.).

Cabe aclarar que en el presente trabajo se desarrollan, a modo de ejemplo, los cálculos de la energía consumida por las palanquillas en su calentamiento, a la temperatura de deshornamiento, y el calor que se extrae del proceso por las paredes o muros del horno.

2.5 Estudio de la situación actual de funcionamiento del proceso

Para el análisis de la situación actual se realizó, por una parte, un balance energético en el cual se determinó en que forma y en que proporción el calor aportado por el combustible, se distribuye entre los diferentes entes absorbentes.

La Figura 2 muestra la adopción como **sistema** al interior (laboratorio) del horno, como **frontera** a los muros y a la solera, y como **medio** al ambiente próximo a la instalación.



Figura 2 - Adopción de sistema y medio

Luego con este criterio y los datos recogidos en planta se procedió, por otra parte, al cálculo del rendimiento energético del proceso.

En la Tabla 1 se detallan los resultados obtenidos del estudio de la situación actual.

Tabla 1 - Valores e incidencia de la distribución del calor

	Denominación del sistema	Descripción	Calor		
			Magnitud	%	
Calor Generado	1	Calor generado por el Combustible	El producto del Poder Calorífico por unidad de volumen del combustible (GN) por el consumo del mismo, en la misma unidad, da la energía total que se genera en la combustión ^{[3] [4] [8]} .	14.289,1 KW	100%
Distribución del Calor Generado	2	Calor extraído por el acero	El acero en el proceso de calentamiento, consume energía calórica (calor sensible) para elevar su temperatura hasta la de deshornamiento. Además de ésta, debido a los cambios alotrópicos que manifiesta al elevar su temperatura, insume también energía calórica (calor latente) en cada uno de estos ^{[3] [4] [8]} .	7.957,8 KW	55,7%
	3	Calor extraído por los Gases de Combustión	El gas de escape, producto de la combustión, está compuesto por O ₂ , N ₂ y CO ₂ , los cuales experimentan un proceso de calentamiento. Éstos elevan su temperatura, desde la del ambiente a la de salida por la chimenea ^{[3] [4] [8]} .	3.673,2KW	25,7%
	4	Calor extraído por las puertas de enhornamiento y de deshornamiento	A través de las puertas se produce contacto directo entre la sala del horno y el medio exterior ^{[1] [2] [5] [6] [7]} .	1.743,6 KW	12,2%
	5	Calor extraído por los Muros	El calor se transfiere, a través de los muros, por conducción hacia el medio exterior ^{[1] [2] [5] [6] [7]} .	365,3 KW	2,6%
	6	Calor extraído por el agua de refrigeración de Rodillos deshornadores	El agua al actuar como refrigerante, en los rodillos, se calienta al atravesar el interior del rodillo por el fenómeno de convección forzada ^{[1] [2] [5] [6] [7]} .	250,2 KW	1,8%
	7	Calor extraído por el Cierre Hidráulico	En este caso, el agua actúa como aislante entre la sala del horno y su sótano, donde se ubica el accionamiento de las vigas galopantes ^{[1] [2] [5] [6] [7]} .	84,5 KW	0,6%
	-	Otros	-	200 KW	1,4%

La Figura 3 muestra, en valores porcentuales, como se distribuye la energía calórica en el proceso de calentamiento de la palanquilla.

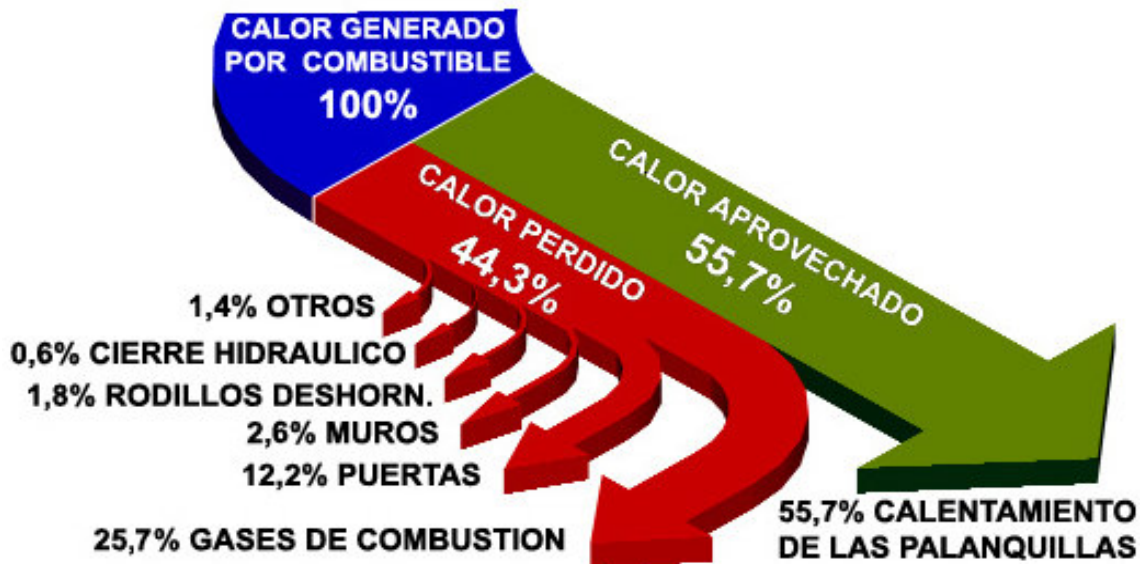


Figura 3 - Valores porcentuales del flujo de calor

A continuación se desarrollarán 2 ítems de la distribución del calor precedentemente señalados, a saber: *potencia calórica consumida por el calentamiento de la carga* (ítem 2) y *potencia calórica extraído por las paredes del horno* (ítem 5).

2.5.1 - Potencia calórica consumida por el calentamiento de la carga

La potencia calorífica que consume la carga de palanquillas hasta llegar a la temperatura de deshornamiento, queda cuantificada en Ecuación (1) por la suma de dos componentes: calor *sensible* (Q_s) y calor *latente* (Q_l).

El calor sensible, el cual queda representado por la Ecuación (2), es el que se le suministra a la carga de palanquilla de acero para aumentar la temperatura hasta los distintos cambios en la red cristalina y hasta la temperatura final de deshornamiento. El calor latente, representado por la Ecuación (3), es el consumido por el acero para manifestar sus cambios en la red cristalina, con la característica de que estos cambios se producen a temperatura constante.

De lo expuesto se desprende la siguiente expresión:

$$Q_{\text{acero}} = Q_s + Q_l \quad (1)$$

$$Q_s = m \times C \times \Delta t \quad (2)$$

$$Q_l = m \times C \quad (3)$$

donde:

Q_{acero} : calor extraído por la carga

Q_s : calor sensible

Q_l : calor latente

C : constante de calor sensible o latente.

m : flujo másico

Δt : salto de temperatura en cambio de estructura

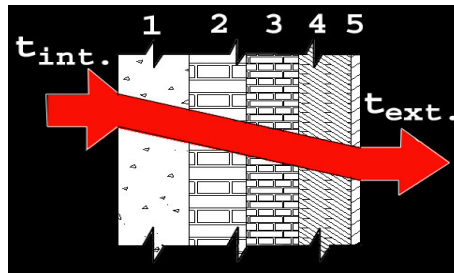
En Tabla 2 se muestra el cálculo del calor extraído por las palanquillas de acero.

Tabla 2 - Cálculo del calor extraído al calentar el acero

		m	x	C	x	Δt	Q
		Kg./h		KJ/Kg.°C		°C	KW
Calor Sensible	Feα	32.940		1,7442x10 ⁻⁴		(760-20)	4251,6
	Feα _{nm}	32.940		2,0698x10 ⁻⁴		(906-760)	995,4
	Feγ	32.940		1,9070x10 ⁻⁴		(1240-906)	2098,0
		m	x	C			
		Kg./h		KJ/Kg.			
Calor Latente	Feα _{nm}	32.940		1,3953x10 ⁻²		760	459,6
	Feγ	32.940		4,6512x10 ⁻³		906	153,2
Σtotal → Q_{acero}							7957,8

2.5.2 - Potencia calórica transferida a través de las paredes del horno

Ésta queda representada por la pérdida de calor que se manifiesta, por conducción, a través de los muros delimitantes del horno como se aprecia en la Figura 4. Para cuantificarlo, debido a la diferencias de temperaturas externas medidas para una misma pared, se dividió el total de la superficie de cada una de las mismas, en áreas de menor tamaño. Cada una de estas tenía como característica fundamental que la temperatura de la cara interna era constante a lo largo de toda la sección. En Tabla 3 se observan las especificaciones de los componentes del muro.



- 1- Didurit 160 ó Diplastit 165 (Hormigón);
- 2- Sial 140 (ladrillo refractario);
- 3- Sial 125 (ladrillo aislante);
- 4- Pyrostop Isol 450 (fibra cerámica);
- 5- Chapa de Acero

Figura 4 - Composición de los muros

Tabla 3 - Especificaciones de los muros

SOLERA					PAREDES, PUERTAS Y BOVEDA				
Pos.	Material	Espesor (e) [m]	Conductividad Térmica (λ) [KW/m°C]	Resistencia Térmica (R _{tér.})	Material	Espesor (e) [m]	Conductividad Térmica (λ) [KW/m°C]	Resistencia Térmica (R _{tér.})	
	Denominación			R _{tér.} = e/λ [m ² °C /KW]				Denominación	R _{tér.} = e/λ [m ² °C /KW]
1	Hormigón cód.: didurit 160	0,182	2,256x10 ⁻³	80,67	1	Hormigón cód.: diplastit 165	0,205	9,068x10 ⁻⁴	226,07
2	Ladrillo Refractario cód.: sial 140	0,115	1,221x10 ⁻³	94,19	2	Ladrillo Refractario cód.: sial 140	0,065	1,221x10 ⁻³	53,24
3	Ladrillo Aislante cód.: sial 125	0,115	3,104x10 ⁻⁴	370,49	3	Ladrillo Aislante cód.: sial 125	0,065	3,104x10 ⁻⁴	209,41
4	Fibra cerámica cód.: pyrostop isol 450	0,125	2,326x10 ⁻⁴	537,4	4	Fibra cerámica cód.: pyrostop isol 450	0,115	2,326x10 ⁻⁴	494,41
5	Chapa de acero	0,008	4,477x10 ⁻²	0,18	5	Chapa de acero	0,006	4,477x10 ⁻²	0,13
TOTAL		(Σ R _{tér.} en serie)		1082,93	TOTAL		(Σ R _{tér.} en serie)		983,26

Luego de considerar los distintos componentes de las paredes y sus especificaciones, se efectuó el cálculo de la pérdida calórica de cada uno de los sectores.

Finalmente, la potencia calórica total disipada por conducción a través de las paredes, bóveda y solera surgió de la suma, por cada sector, de las pérdidas de calor. De los cálculos resulta:

$$Q_{\text{total extraído por los muros}} = 363,5 \text{ KW}$$

2.6- Propuestas de mejoras para el proceso

Uno de los temas a desarrollar por el presente estudio, es revelar distintas alternativas que arrojen como resultado el aumento del rendimiento energético del proceso en cuestión.

Es necesario informar que la única forma de aumentar dicho rendimiento es minimizando el consumo de gas natural del horno. Esto se debe a la imposibilidad de aumentar la cantidad de material a procesar, debido a que quién determina ésta, es la capacidad instalada del tren laminador en la planta.

Se presentan y desarrollan a continuación alternativas diferentes con el fin de aumentar dicho rendimiento.

2.6.1- Alternativa 1: Reparación de la Puerta de carga del Horno

Al momento de desarrollarse el presente estudio, la puerta de carga no funcionaba correctamente, permaneciendo abierta todo el tiempo. Este funcionamiento deficiente se traduciría en una pérdida de energía calórica por convección y radiación, implicando un mayor consumo de gas natural con la consecuente pérdida de dinero para la empresa.

La puerta de carga del horno fue concebida en el diseño original con un sistema de apertura y cierre. La frecuencia de apertura y de cierre era de 180 veces/hora, es decir, 3 veces/minuto.

Se procedió entonces a analizar esta situación y mediante un cálculo por sistema de tanteo, se determinó que la potencia calórica ahorrada como consecuencia del correcto funcionamiento de la puerta de enhornamiento resultaría ser de:

$$Q_{\text{ahorrado alternativa 1}} = 927,8 \text{ KW}$$

Este valor equivale al consumo de 96,45 Nm³GN/h. En la FIGURA 5 podemos visualizar estos valores en porcentaje de la situación actual.

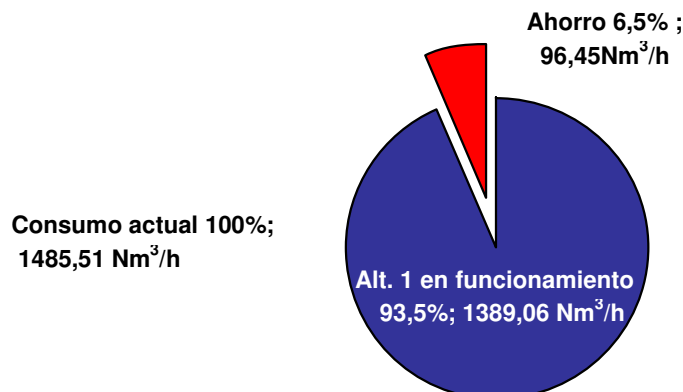


Figura 5 - Comparación porcentual del consumo actual con la aplicación de Alternativa 1

2.6.2- Alternativa 2: Calentamiento Previo del Aire de Combustión

Otra alternativa a estudiar para el ahorro de consumo de gas natural consistió en ver la posibilidad de precalentar el aire de combustión que utilizan los quemadores. Este estudio incluyó el desarrollo de dos acciones.

Por un lado determinar que economía en el consumo de combustible resultaría de dicho precalentamiento. Por otro lado ver la posibilidad, desde el punto de vista de la instalación, de montar el equipo necesario para dicho proceso.

Para la primera consigna se llegó a determinar mediante un cálculo iterativo que el ahorro de potencia que resultaría de dicho precalentamiento sería de:

$$Q_{\text{ahorrado alternativa 2}} = 2.173,9 \text{ KW}$$

Este valor equivale al consumo de $226 \text{ Nm}^3/\text{h}$. En la Figura 6 se visualizan estos valores en porcentaje respecto de la situación actual.

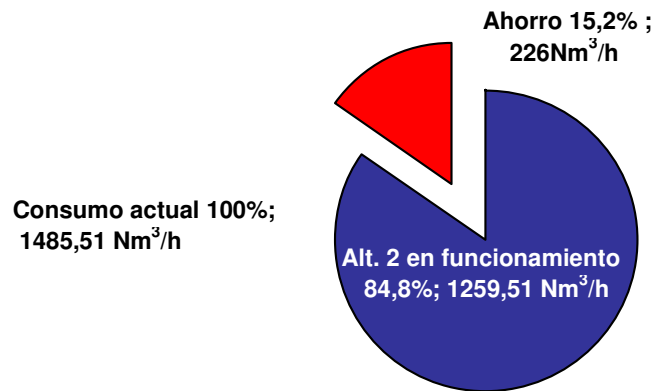


Figura 6 - Comparación porcentual del consumo actual con la aplicación de Alternativa 2

El desarrollo de esta consigna incluyó un relevamiento de campo para precisar si era viable la instalación del equipamiento necesario para precalentar el aire. Éste se detalla en la Figura 7.

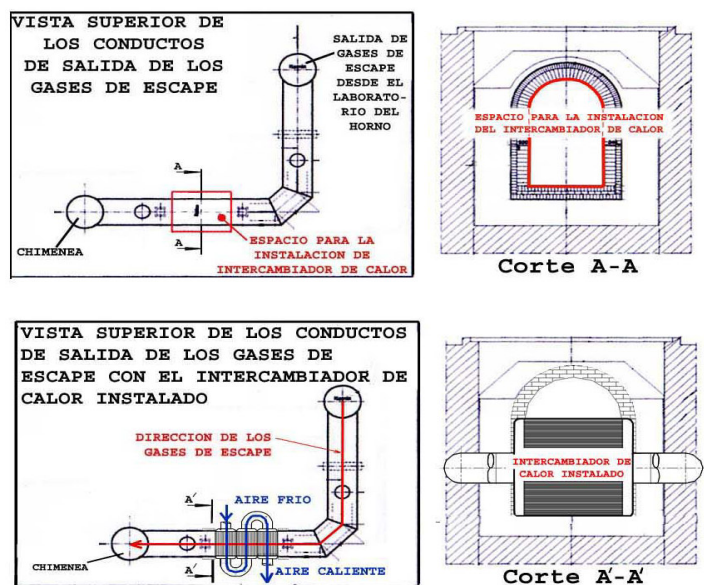


Figura 7 - Esquema de la instalación del intercambiador de calor

3- CONCLUSIONES

- Del análisis de funcionamiento en la actualidad del horno, surgió que el consumo de gas natural es de $1.485,51 \text{ Nm}^3\text{GN/h}$ y su **rendimiento energético** es de **55,7%**.
- Si se repara la puerta de carga del horno, esto generaría un ahorro en el consumo de gas natural (combustible) de **$96,45 \text{ Nm}^3\text{GN/h}$** produciendo esto una mejora en el rendimiento del **6,5%**.
- La instalación del intercambiador de calor, ubicado en el ducto de salida de los gases del horno, que precaliente el aire de la combustión del gas natural utilizado en el proceso, origina un ahorro de combustible de **$226 \text{ Nm}^3\text{GN/h}$** , representando esto una mejora en el rendimiento en un **15,2%**.
- La superposición de acciones, esto es, la implementación de la reparación de la puerta de entrada al horno y la instalación del precalentador de aire de combustión, genera un ahorro total de combustible de **$322,45 \text{ Nm}^3\text{GN/h}$** y una mejora en el rendimiento energético del proceso de **21,7%**.
- Si se expresa la magnitud del ahorro en el consumo de combustible (gas natural) en períodos anuales, se podrá percibir que éste es realmente importante y representa alrededor de los $2,8 \times 10^6 \text{ Nm}^3\text{GN}$ anuales.
- Tomando como referencia un consumo domiciliario estándar de la Argentina, se puede afirmar que el ahorro mensual generado en el proceso, aplicando las alternativas antes desarrolladas, representa el consumo de **1440 viviendas** en el mismo período.

En la Figura 8 se puede visualizar, en valores porcentuales, como influyen ambas alternativas de mejoras planteadas respecto del consumo de combustible (gas natural).

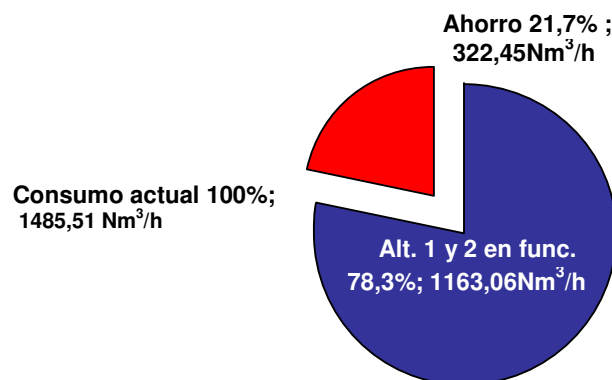


Figura 8 - Comparación porcentual del consumo actual con la aplicación de Alternativa 1 y 2

La Figura 9 muestra como interviene la aplicación de las alternativas 1 y 2 en conjunto, en la optimización del rendimiento energético del proceso de calentamiento de palanquillas de acero. Esto se logra mediante la disminución en el consumo de gas natural (combustible).



Figura 9 - Valores porcentuales del flujo de calor con las alternativas 1 y 2 aplicadas

4- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J.P. Holman, *Transferencia de Calor*, McGraw Hill, 8ª Edición, (1998).
- [2] Yunus A. Çengel, *Transferencia de Calor*, McGraw Hill, 2ª Edición, (2005).
- [3] Yunus a Çengel – Michael A. Boles, *Termodinámica*, McGraw Hill, 4ª Edición, (2004).
- [4] Kenneth Wark – Donald E. Richards, *Termodinámica*, McGraw Hill, 6ª Edición, (2004).
- [5] James R. Welty, *Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería*, Limusa, 1ª Edición, (1978).
- [6] M. Necati Özişik, *Transferencia de Calor*, McGraw Hill, 1ª Edición, (1979).
- [7] James R. Welty - Charles E. Wicks - Robert E. Wilson, *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*, Noriega Limusa (Noriega Editores), 1ª Edición, (1991).
- [8] Virgil Moring Faires – Clifford Max Simmang, *Termodinámica*, Limusa, 7ª Edición, (2001).

5- ACLARACIONES Y RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue desarrollado íntegramente por alumnos de la Cátedra SISTEMAS DE CONTROL EN INSTALACIONES TERMICAS, dictada en el 5º año de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás - UTN.

Para la presentación de mismo, en el Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, a desarrollarse los días 1, 2 y 3 de Octubre de de 2008 en la Universidad del Sur de Bahía Blanca, agradecemos al Ing. Neoren German Franco, Jefe de Departamento de Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás - UTN, por el apoyo brindado.