



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO Y PREFABRICACIÓN DE  
UN HORNO PARA EL PROCESO DE  
FORJADO**

Pablo Gil Rodas

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Ciudad, Colombia  
Año



DISEÑO Y PREFABRICACIÓN DE UN HORNO PARA EL PROCESO DE FORJADO  
DESTINADO A LA EMPRESA SISPRO S.A

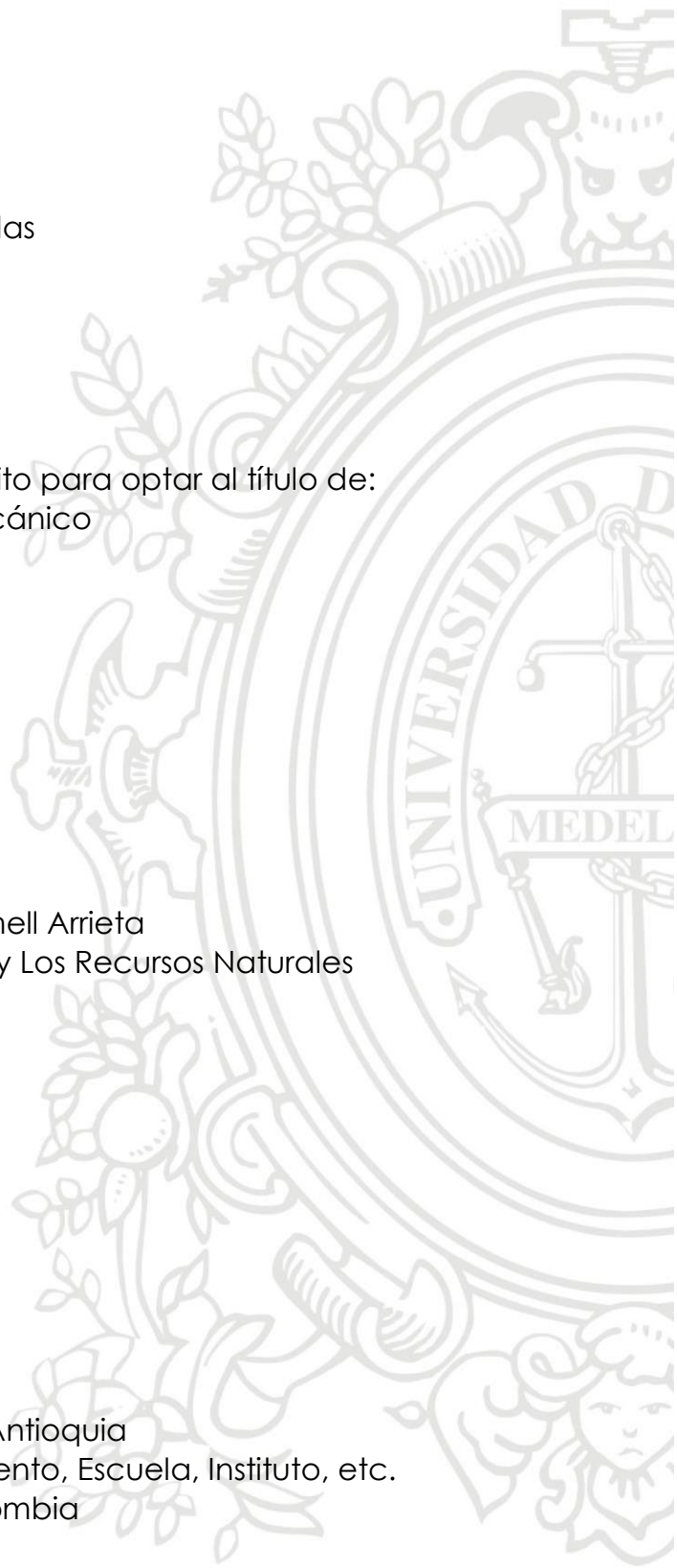
Pablo Gil Rodas

Informe de práctica como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Mecánico

Asesor

Andrés Adolfo Amell Arrieta  
M. Sc. En Economía de La Energía y Los Recursos Naturales

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento, Escuela, Instituto, etc.  
Ciudad, Colombia  
Año



# DISEÑO Y PREFABRICACIÓN DE UN HORNO PARA EL PROCESO DE FORJADO DESTINADO A LA EMPRESA SISPRO S.A

---

## 1. Resumen

Se buscó diseñar un horno de forja para facilitar los procesos de fabricación de diferentes elementos, optimizar los recursos utilizados, y garantizar mejores acabados. Actualmente, la empresa SISPRO S.A. cuenta con un horno que es utilizado para este fin. Sin embargo, no cumple con los requisitos de seguridad, y brinda bajos porcentajes de eficiencia energética.

Para llevar a cabo el proyecto, con el acompañamiento del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Eficiente y Racional de la Energía (GASURE) de la Universidad de Antioquia, se realizó un diagnóstico de combustión de las condiciones bajo las que opera el horno actual. Con este, se encontró la existencia de pérdidas de combustión. Adicionalmente, se determinaron las cantidades y composiciones de algunos gases emitidos por la máquina, encontrando el grado de emisividad del horno.

Con este estudio, se pudo encontrar la distribución de energías tras la entrada de cierta potencia. Se encontró que la energía se empleaba principalmente en pérdida por paredes, calor sensible gases de chimenea, vaporización del agua y finalmente lo que en realidad llegaba a la pieza.

Tras encontrar la causa de las pérdidas, se realizaron una serie de cálculos y diseños, proponiendo la construcción de un horno que cumpliera con los requerimientos de producción de la empresa, las condiciones de salubridad y seguridad para los trabajadores, la disminución del impacto ambiental, un aumento en la eficiencia, beneficios económicos a mediano y largo plazo, entre otros aspectos. Dentro de la etapa de diseño, se desarrollaron diferentes hornos con geometrías distintas con el fin de garantizar el mejor aprovechamiento de los recursos.

Finalmente, se calculó el tiempo estimado de calentamiento del horno y de la carga, para así considerar la posible reducción de combustible durante un tiempo de uso determinado. Además, se entregaron cotizaciones y sus respectivos tiempos de retorno de la inversión.

## 2. Introducción

La compañía Sistemas integrales de alta producción S.A (SISPRO) es una industria metalmeccánica encargada de diseñar, fabricar e instalar, los diversos productos que demande el mercado, realizados generalmente en acero, tales como pernos estructurales, formaletería, rejas, anclajes, riostras, cangilones, cadenas, carcasas para quemadores, entre otros elementos destinados en gran medida para la industria de la construcción, minería y energía. Según informa el ministerio de comercio, industria y turismo, en el año 2018, “El subsector de mayor crecimiento fue el de la fabricación de productos elaborados de metal, registrando un crecimiento de 14,8%, en su producción real, y de 19, 1% en sus ventas reales. Por otra parte, las ventas externas del sector crecieron en 16, 1% en el mes de mayo de 2018.”



(Ministerio de comercio, industria y turismo, 2018) Validando la importancia del sector para la economía del país.

Con el fin de garantizar un desempeño óptimo en los productos que se fabrican se debe hacer el adecuado tratamiento a los materiales, el cual se realiza dependiendo de la composición y comportamiento de los materiales en cuanto a sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. Actualmente en SISPRO se realizan distintos tratamientos, entre ellos el forjado, que es el encargado de dar una forma final a un elemento obteniendo propiedades y características del metal que cumplan con los requisitos especificados por el cliente. En la empresa existe un horno de forjas que no posee control de temperatura, además de existir problemas en el aislamiento térmico y pérdidas de eficiencia por no tener un control estequiométrico de la combustión. El problema se alarga cuando a algunos materiales, como por ejemplo aceros inoxidables que se deban forjar, al no saber la temperatura a la que se forja, se debe posteriormente volver a pasar a un horno con control de temperatura, volviendo a generar un gasto de energía en potencia para llevarlo a la temperatura adecuada para el tratamiento.

Por esto la finalidad del proyecto es plantear un diseño de un horno adecuado para el procedimiento de forjado, con el fin de realizar las correcciones a los problemas mencionados, que mejorará la metodología existente, ahorrará costos de combustible, puesto que si la combustión se realiza adecuadamente se necesitará menos combustible para llegar a la temperatura de forjado, mejorará la salud ocupacional del operario, dado que el aislamiento térmico del horno será corregido y la temperatura a los alrededores no será tan alta como la actual, dará una mayor capacidad de producción que la actual, dado que el tiempo requerido para llegar a una temperatura adecuada para la forja de acero puede alcanzar las 3 horas, según informan los forjadores de la empresa, tiempo que se verá acortado con el nuevo diseño.

Cabe resaltar que el combustible de funcionamiento va a ser gas natural y que, al mejorar la calidad de la combustión, de la misma manera se disminuirá la cantidad de gases contaminantes como por ejemplo el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos, mejorando la salud ocupacional de la empresa en general.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. General**

Diseñar un horno de forja que cumpla con los requerimientos de producción, calidad, salud ocupacional, gestión ambiental y eficiencia energética de la empresa SISPRO S.A.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Apropiar los requerimientos internos y externos esenciales para diseñar un horno de forja a partir de la revisión de la información necesaria.

- Diseñar un horno para forja con base a una metodología de diseño conceptual, básico y de detalle que permita cuantificar los costos de fabricación.
- Presentar planos de fabricación, tabla de costos y manual de operación del horno.

## 4. Marco teórico

### 4.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor puede describirse como la energía que está siendo transportada mediante la diferencia de temperatura entre cuerpos. Se da gracias a un movimiento ordenado del sistema durante la realización de un trabajo mecánico. Al haber una diferencia de temperatura, la energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura. Se busca llegar a que haya una distribución uniforme de temperaturas para así encontrar el estado de equilibrio térmico de los materiales.

La termodinámica estudia la transferencia de energía entre cuerpos, siempre y cuando se tenga estado de equilibrio. Sin embargo sirve como herramienta para predecir la cantidad de energía necesaria para llevar un sistema de un estado de equilibrio a otro.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación

#### 4.1.1. Conducción

Durante el contacto directo de los cuerpos que tengan diferentes temperaturas se genera acoplamiento de las moléculas de los sistemas tras la transmisión de energía calorífica. Yanus Cengel (2007) en su libro transferencia de calor, propone la siguiente definición de conducción:

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. (Cengel, 2007, pg 17)

Existen factores que influyen en gran medida en la velocidad en la que ocurre la conducción de calor. Entre estos se encuentra el espesor del material, la geometría del cuerpo, las condiciones de temperatura externa, el área superficial, el tamaño del elemento, entre otros. La razón de conducción es directamente proporcional a el área y a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional a el espesor. Adicionalmente se puede calcular con la ecuación proveniente de la ley de Fourier de la conducción de calor:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde la constante de proporcionalidad  $k$  es la conductividad del material. Por tu parte,  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura y  $A$  el área de transferencia de calor, perpendicular a la dirección de transferencia (Cengel, 2007). Para que transmisión del calor debe cumplirse que la distribución de temperaturas no sea uniforme, es decir se necesita que haya un gradiente de temperaturas entre diferentes puntos del elemento

y solo se tendrá esa diferencia de temperaturas en la dirección perpendicular y no en las tangenciales, por lo tanto, el flujo de calor debe darse en esa misma trayectoria.

#### **4.1.2. Convección**

La interacción de moléculas gracias al movimiento física de zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura da lugar a la transmisión de energía calórica. Este escenario permite que se equilibren las temperaturas y es conocido como conducción superficial. Recibe este nombre gracias a que el flujo de calor entre un fluido y la superficie de un elemento se da por la conducción a través de una fina capa del fluido la cual está en contacto con la superficie del material. Adicionalmente, el proceso de conducción superficial puede provocar un desplazamiento físico de la materia de unas zonas a otras generando convección natural, una diferencia de temperaturas y cambio en las densidades. La convección puede ocurrir de forma natural o forzada dependiendo de las condiciones de movimiento de las superficies en contacto.

Por la gravedad los fluidos cuentan con sectores con densidades diferentes. Las zonas más densas que a su vez son las más frías y se encuentran en la parte superior. Mientras que las zonas menos densas y calientes están abajo. Las partículas más densas se mueven hacia donde se encuentran las menos densas, desplazando así el fluido que allí se encuentra. Como ejemplo, el aire frío como es más denso se desplaza hacia los lugares más bajos, desplazando el aire caliente que a su vez, se mueve hacia arriba. Allí se presenta, una circulación de materia que ayuda a equilibrar la temperatura del sistema. Esta es una forma de convección.

Se puede entender la convección como un proceso de transferencia de calor entre dos sectores de diferente temperatura. El cual se da gracias al desplazamiento de materia fría hacia zonas calientes y viceversa. Este solo se puede dar en los fluidos ya que únicamente en ellos puede presentarse movimiento de materia. Cengel define la convección como:

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos (Cengel, 2007, pg 25)

La convección puede presentarse de forma natural o forzada. Se entiende como convección natural el proceso por el cual las paredes en contacto con el sistema están en reposo, mientras que se dice que la convección es forzada cuando algunas de las paredes en contacto con el fluido se mueven incentivando su circulación. En el libro Transferencia de Calor y Masa se da un ejemplo de enfriamiento mediante convección forzada y natural. Este se muestra en la figura 1. La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido (Cengel, 2007, pg 26)



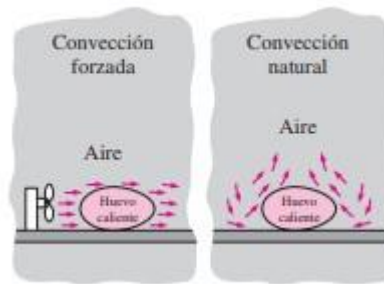


Figura 1 Enfriamiento mediante convección natural y forzada. Fuente: Libro *Transferencia de Calor y Masa*, Yunus Cengel.

Mediante la ley de Newton del enfriamiento es posible determinar la rapidez de la transferencia de calor por convección. Se sabe que la rapidez es proporcional a la diferencia de temperatura y se define como

$$\dot{Q}_{conv} = A_s h (T_s - T)$$

En donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $A_s$  es el área por la que se da la transferencia de calor por convección,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T$  es la temperatura del fluido. (Cengel, 2007). Otra forma de definir el coeficiente de convección es a través de un parámetro adimensional denominado número de Nusselt que está definido como

$$N_u = \frac{hL}{\lambda}$$

En función de la conductividad térmica del material  $\lambda$ , del coeficiente de convección promedio en la superficie  $h$  y de una longitud dada por  $L$ . El número de Nusselt es una medida de la relación entre las tasas de transferencia de calor por convección y por conducción en un fluido. Esto es explicado por Agustín Martín Domingo en su estudio *Apuntes de Transmisión de Calor*.

El movimiento del fluido producido por la convección a lo largo de la superficie tiene características específicas. De esta manera en la superficie del cuerpo se satisface la condición donde el fluido está en reposo y existe un predominio de las fuerzas viscosas sobre las inerciales. A medida que se va separando de la superficie aumenta la influencia de las fuerzas de inercia. Sin embargo, hasta la capa límite predominan las viscosas. Hasta este punto se considera el flujo como laminar. Al pasar esta capa, alejándose aún más de la superficie se tiene que el flujo se convierte en turbulento. El paso de un flujo a otro se caracteriza mediante el número de Reynolds. Así en la misma superficie se satisface la denominada condición de no deslizamiento en la que el

#### 4.2. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos que buscan general cambios estructurales en un material, y a su vez modificar sus propiedades mecánicas. Involucran una serie de técnicas de calentamiento y enfriamiento que le proporcionan al elemento tratado unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final.

Estos no modifican la composición química, pero si factores como granulometría y forma.

Existen varios tipos de tratamientos térmicos que buscan brindarle al material o elemento unas características distintas como fundir y dar forma, aliviar endurecimiento por la deformación, brindar resistencia y dureza, entre otros.

#### 4.2.1. Recocido

Es un tratamiento térmico que busca de bajar la densidad de dislocaciones para así, brindar ductilidad. Consiste en el calentamiento durante periodos de tiempo largos. Se realiza principalmente para:

- Aliviar esfuerzos residuales causados por procesos de formado previo
- Alterar la estructura del material y así obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales.

Entre los recocidos existen varios tipos , como lo son:

1. Recocido completo.
2. Recocido incompleto.
3. Recocido de globalización.
4. Recocido de recristalización.
5. Recocido de homogenización

Y en la figura 2 se observa la diferencia de estos tratamientos que radica en el calentamiento y enfriamiento que se le hace a la pieza de trabajo.

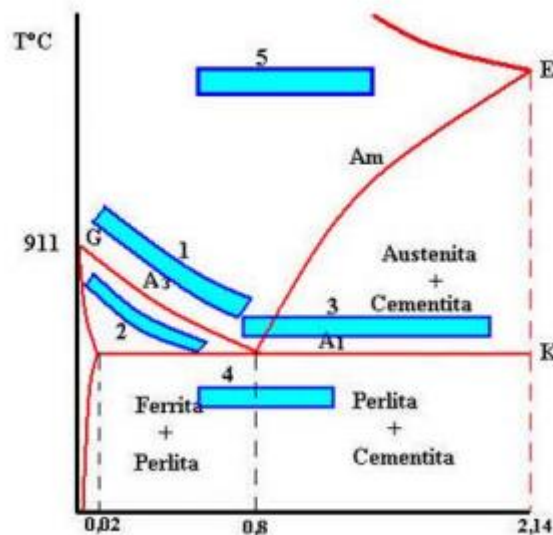


Figura 2. Tipos de recocido. Fuente: Rufino Medina (2015). Ciencia de los materiales 2. Universidad de Antioquia.

Para los diferentes recocidos se muestra la temperatura teórica que debe alcanzar el acero, recordando que esto varía según los aleantes que tenga el acero principalmente el contenido de carbono, y el tiempo de exposición. Donde dice al aire,



se refiere a que cuando la pieza alcance la temperatura indicado se saca del horno y se deja enfriar al aire, es decir que no se mantiene la temperatura sobre la pieza.

*Tabla 1. Temperatura y tiempos de exposición para recocer acero.*

Tipo	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Completo	800	Al aire
Incompleto	750	Al aire
Globalización	925	180-240
Recristalización	775	30-120
Homogenización	650	Al aire

#### 4.2.2. Temple

El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la resistencia mecánica y dureza del material. Se transforma el cuerpo con calentamiento y luego se le imprime un enfriamiento brusco. En este proceso, tiene gran importancia la fase de enfriamiento y su alta velocidad. Existen varios tipos de temple, en los cuales varía el resultado que se quiera obtener y según su templabilidad, la cual es su capacidad de penetración. Adicionalmente, depende en gran medida del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero. En la tabla se muestran la temperatura de temple de los aceros al carbono más comunes.

*Tabla 2. Temperatura de temple para diferentes tipos de acero. Fuente: Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition). Pág. 973.*

Steel	Temperature		Steel	Temperature		Steel	Temperature	
	°C	°F		°C	°F		°C	°F
<b>Carbon steels</b>			1146	800-845	1475-1550	50B60	800-845	1475-1550
1025	855-900	1575-1650	1151	800-845	1475-1550	5130	830-855	1525-1575
1030	845-870	1550-1600	1536	815-845	1500-1550	5132	830-855	1525-1575
1035	830-855	1525-1575	1541	815-845	1500-1550	5135	815-845	1500-1550
1037	830-855	1525-1575	1548	815-845	1500-1550	5140	815-845	1500-1550
1038(a)	830-855	1525-1575	1552	815-845	1500-1550	5145	815-845	1500-1550
1039(a)	830-855	1525-1575	1566	855-885	1575-1625	5147	800-845	1475-1550
1040(a)	830-855	1525-1575				5150	800-845	1475-1550
1042	800-845	1475-1550	<b>Alloy steels</b>			5155	800-845	1475-1550
1043(a)	800-845	1475-1550	1330	840-855	1525-1575	5160	800-845	1475-1550
1045(a)	800-845	1475-1550	1335	815-845	1500-1550	51B60	800-845	1475-1550
1046(a)	800-845	1475-1550	1340	815-845	1500-1550	50100	775-800(c)	1425-1475(c)
1050(a)	800-845	1475-1550	1345	815-845	1500-1550	51100	775-800(c)	1425-1475(c)
1055	800-845	1475-1550	3140	815-845	1500-1550	52100	775-800(c)	1425-1475(c)
1060	800-845	1475-1550	4037	830-855	1525-1575	6150	845-885	1550-1625
1065	800-845	1475-1550	4042	830-855	1525-1575	81B45	815-855	1500-1575
1070	800-845	1475-1550	4047	815-855	1500-1575	8630	830-870	1525-1600
1074	800-845	1475-1550	4063	800-845	1475-1550	8637	830-855	1525-1575
1078	790-815	1450-1500	4130	815-870	1500-1600	8640	830-855	1525-1575
1080	790-815	1450-1500	4135	845-870	1550-1600	8642	815-855	1500-1575
1084	790-815	1450-1500	4137	845-870	1550-1600	8645	815-855	1500-1575
1085	790-815	1450-1500	4140	845-870	1550-1600	86B45	815-855	1500-1575
1086	790-815	1450-1500	4142	845-870	1550-1600	8650	815-855	1500-1575
1090	790-815	1450-1500	4145	815-845	1500-1550	8655	800-845	1475-1550
1095	790-815(a)	1450-1500(b)	4147	815-845	1500-1550	8660	800-845	1475-1550
			4150	815-845	1500-1550	8740	830-855	1525-1575
<b>Free-cutting carbon steels</b>			4161	815-845	1500-1550	8742	830-855	1525-1575
1137	830-855	1525-1475	4337	815-845	1500-1550	9254	815-900	1500-1650
1138	815-845	1500-1550	4340	815-845	1500-1550	9255	815-900	1500-1650
1140	815-845	1500-1550	50B40	815-845	1500-1550	9260	815-900	1500-1650
1141	800-845	1475-1550	50B44	815-845	1500-1550	94B30	845-885	1550-1625
1144	800-845	1475-1550	5046	815-845	1500-1550	94B40	845-885	1550-1625
1145	800-845	1475-1550	50B46	815-845	1500-1550	9840	830-855	1525-1575
			50B50	800-845	1475-1550			

#### 4.2.3. Revenido

El Revenido es un tratamiento complementario del Temple, que generalmente se hace después. Tras el temple, los aceros suelen quedar duros y frágiles. Por esta razón se utiliza el revenido para disminuir la dureza y fragilidad, sin perder mucha tenacidad., la principal diferencia entre este y un recocido radica en que en el recocido se busca como principal composición la bainita, mientras que el revenido busca aliviar las tensiones pero sin transformar la martensita que es la fase disuelta. En la tabla se muestra la temperatura de recocido de los aceros al carbono más comunes.

*Tabla 3. Temperatura de temple para diferentes tipos de acero. Fuente: Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition). Pág. 974.*

Steel	Temperature		Steel	Temperature		Steel	Temperature	
	°C	°F		°C	°F		°C	°F
<b>Carbon steels</b>			1526	760-790	1400-1450	4626	815-845	1500-1550
1010	760-790	1400-1450	1527	760-790	1400-1450	4718	815-845	1500-1550
1012	760-790	1400-1450				4720	815-845	1500-1550
1015	760-790	1400-1450	<b>Free-cutting carbon steels</b>			4815	800-830	1475-1525
1016	760-790	1400-1450	1109	760-790	1400-1450	4817	800-830	1475-1525
1017	760-790	1400-1450	1115	760-790	1400-1450	4820	800-830	1475-1525
1018	760-790	1400-1450	1117	760-790	1400-1450	8115	845-870	1550-1600
1019	760-790	1400-1450	1118	760-790	1400-1450	8615	845-870	1550-1600
1020	760-790	1400-1450	<b>Alloy steels</b>			8617	845-870	1550-1600
1022	760-790	1400-1450	3310	790-830	1450-1525	8620	845-870	1550-1600
1513	760-790	1400-1450	4320	830-845	1525-1550	8622	845-870	1550-1600
1518	760-790	1400-1450	4615	815-845	1500-1550	8625	845-870	1550-1600
1522	760-790	1400-1450	4617	815-845	1500-1550	8627	845-870	1550-1600
1524	760-790	1400-1450	4620	815-845	1500-1550	8720	845-870	1550-1600
1525	760-790	1400-1450	4621	815-845	1500-1550	8822	845-870	1550-1600
						9310	790-830	1450-1525

#### 4.2.4. Forjado

Forjar es el proceso de usar presión para conformar metal. La presión puede aplicarse por medio de una herramienta, ya sea golpeando o comprimiendo. En los procesos de fabricación, la tecnología de forjado tiene un lugar especial porque ayuda a producir partes de propiedades mecánicas con mínimo desperdicio de material. En la forja, el material de partida tiene una geometría simple; este material, habiendo sido calentado a una temperatura muy superior a la crítica, se ablanda y se deforma plásticamente en una o más operaciones conformando un producto de configuración relativamente compleja.

Las dimensiones de la forja reducen drásticamente los requisitos para las operaciones de mecanizado, lo que resulta en un ahorro significativo de materiales y energía. La forja generalmente requiere herramientas relativamente caras. Por lo tanto, el proceso es económicamente atractivo solo cuando se debe producir una gran cantidad de piezas o cuando las propiedades mecánicas requeridas en el producto terminado se pueden obtener solo mediante un proceso de forjado. Se puede evidenciar en la Figura 3.

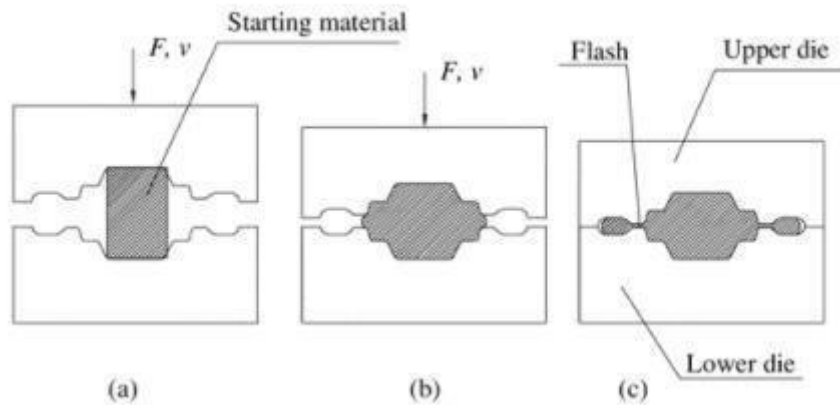


Figura 3. Proceso de forjado. Fuente: libro *Metal Shaping Processes - Casting and Molding*

Es importante el calentamiento para la realización de piezas forjadas dado que el calor es el encargado de maleabilizar la pieza, de este modo a pesar de que este en estado sólido se encuentra en un momento pastoso, donde la materia está más semejante al sólido que al líquido pero donde se puede aplicar grandes esfuerzos sin generar rupturas en el material sino solo cambios en su forma.

Las principales ventajas de las piezas forjadas son su alta resistencia a los diferentes esfuerzos, puesto que comparando las fibras de un material que se manufacturó mediante el forjado y otra pieza que se manufacturó mediante el proceso de mecanizado o arranque de viruta, en uno las fibras se deforman, mientras que en el otro las fibras son cortadas como se aprecia en la figura 4. Y dado que las fibras de material no se destruyen, sino que se deforman esto conlleva que se endurezca el material por deformación.

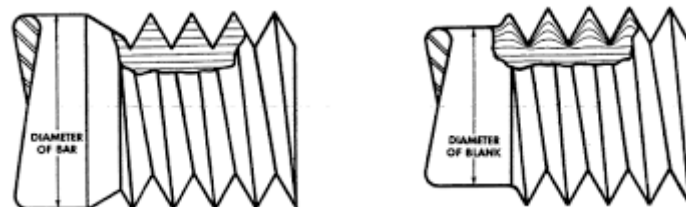


Figura 4. Fibras de una rosca mecanizada y otra conformada. Fuente: Darshith, S. Ramesh, K. Manjunath, S. *Comprehensive Study of Cut and Roll Threads*.

En el mercado local, los principales materiales que se forjan, hablando específicamente de aceros, y las temperaturas correspondientes de forjado se muestran en la tabla 4.

#### Tabla de materiales a forjar

### 4.3. Tipos de Hornos

Los hornos son los dispositivos encargados de calentar un material y se pueden clasificar de distintas maneras, entre las más generales se pueden clasificar según su fuente de energía, entre ellos están:

- *Combustion-based process heating systems*



- *Electric process heating systems*
- *Heat recovery and heat exchange systems.*

Entre los procesos de calentamiento se va centrar en los sistemas de calentamiento basados en combustión, entre estos también se encuentran varios tipos y se clasifican según su forma o finalidad, entre ellos se encuentran:

#### **4.3.1. Atmosphere generators.**

Se utiliza para preparar atmósferas de protección. Los procesos incluyen la fabricación de gas endotérmico utilizado principalmente para proteger el acero y el hierro durante el procesamiento y el gas exotérmico utilizado para proteger los metales, pero también para purgar el oxígeno o los gases volátiles de las zonas confinadas.

#### **4.3.2. Blast furnaces.**

Hornos que queman combustible sólido con una ráfaga de aire, a menudo utilizados para fundir mineral.

#### **4.3.3. Crucible furnaces.**

Horno en el que los materiales calentados se mantienen en un recipiente refractario para procesos como el de fusión o calcinación.

#### **4.3.4. Dryer.**

Un dispositivo que elimina el agua libre, u otros componentes volátiles, desde materiales a través de la calefacción directa o indirecta. Estos secadores pueden ser agrupados en varias categorías basadas en factores tales como operación continua vs lote, material sistema de manipulación, o fuente de generación de calor.

#### **4.3.5. Kilns.**

Horno utilizado para hornear, secar y quemar cerámica o madera. Este tipo de horno también se utilizan para calcinar minerales.

#### **4.3.6. Lehrs.**

Horno cerrado utilizado para recocido u otras formas de tratamiento térmico, especialmente en la fabricación de vidrio. Lehrs puede ser del tipo abierto (en el que la llama entra en contacto con la vajilla), o del tipo mufla.

#### **4.3.7. Muffle furnaces.**

Horno en el que se aplica calor en el exterior de una cámara refractaria u otro recinto que contenga el material calentado envuelto por los gases calientes. El calor debe alcanzar la carga fluyendo a través de las paredes del contenedor.

#### 4.3.8. Ovens.

Un horno con cámara en la que las sustancias se calientan para propósitos tales como la cocción y recocido.

#### 4.3.9. Salt bath furnaces.

Sal fundida donde se aplica calor al exterior de la maceta o el interior de la maceta mediante un tubo radiante. hornos de baño se utilizan para procesos como el calor tratamiento de metales y plásticos de curado y caucho.

### 4.4. Instrumentación

#### 4.4.1. Termocupla

También conocidos como termopares, se basan en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, donde la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a distinta temperatura, por tanto, cuando dos cables de metales diferentes se unen en un extremo, un voltaje que es proporcional a la temperatura se genera en el otro extremo.

Este sensor de temperatura formado por la unión de dos metales, con distintas propiedades eléctricas y mecánicas, diseñado con el fin de lograr un diferencial de potencial entre ellos, resulta bastante útil para el proceso del horno porque se hace posible obtener un comportamiento bastante lineal ante cambios altos en la temperatura (del orden de grados centígrados como entrada) manteniendo un cambio pequeño en la señal eléctrica de voltaje, esto en consecuencia proporciona una sensibilidad adecuada del instrumento.

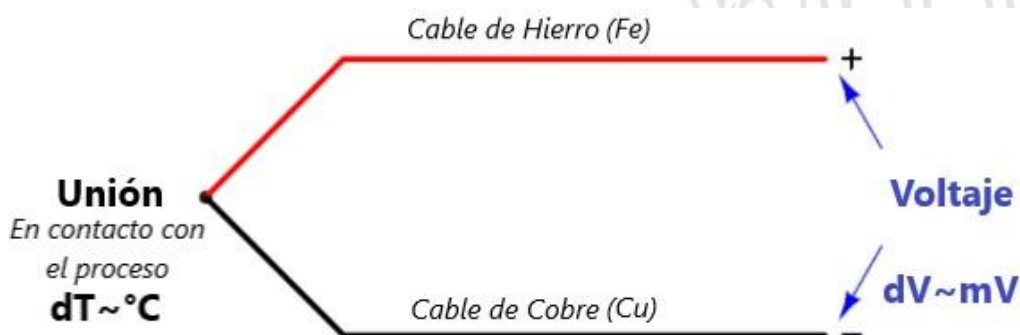


Figura 3. Ejemplo de Termopar Tipo J. Fuente:Elaboración propia

A continuación se puede visualizar la estructura genérica de un Termopar.

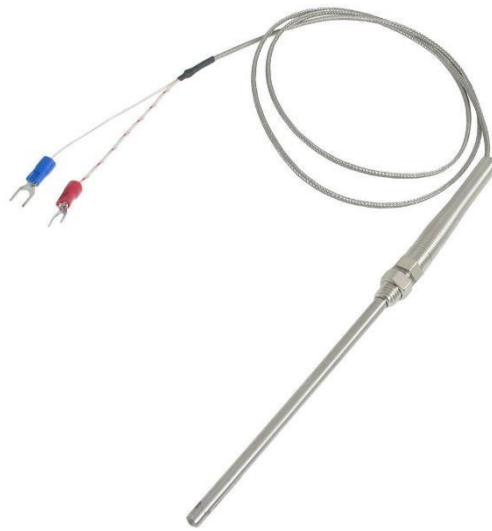


Figura 4. Ejemplo termopar.

#### 4.4.1.1. Tipos y Selección

Las termocuplas tipo J se utilizan principalmente en la industria del plástico, goma en los procesos de extrusión e inyección y en la fundición de metales a bajas temperaturas (Aluminio, Zamac).

Las termocuplas tipo K se utiliza en los procesos de fundición y hornos a temperaturas inferiores de 1300 °C, como lo es la fundición de cobre y varios tratamientos térmicos realizados en los hornos.

Las termocuplas R, S, B se utilizan exclusivamente en los procesos de fundición de acero por lo que se necesitan temperaturas mayores a los 1300 °C.

Tabla 4. Tabla especificaciones para diferentes termocuplas.

Tc	Cable + Aleación	Cable - Aleación	°C	Rango (Min, Max) mV	Volts Max
J	Hierro	cobre/nickel	(-180, 750)	42.2	
K	Nickel/cromo	Nickel/alumnio	(-180, 1372)	54.8	
T	Cobre	cobre/nickel	(-250, 400)	20.8	
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	21.09	
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	18.68	
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0, 1820)	13.814	



#### **4.4.1.2. Linealización para Termocuplas**

La relación entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura entregada al circuito no es lineal, por lo que es necesario realizar una calibración propia al instrumento con las lecturas que muestra el sensor para ciertos rangos de temperatura.

Esta linealización se consigue aplicando las tres leyes de las termocuplas para el tratamiento de las distancias que hay entre el transmisor o el elemento controlador y el extremo que está en contacto directo con el proceso, teniendo en cuenta si se utiliza o no latiguillo extensivo, el cual agrega resistencia y modifica la sensibilidad del instrumento.

### **5. Metodología**

El proyecto se comenzó realizando mediciones pertinentes tanto de tiempo como de consumo de combustible en el horno que actualmente tiene la empresa, con el fin de entender cuáles eran las posibles causas de pérdidas de energía y con este tener claro cuáles eran las situaciones de mejora para el rediseño que se iba a realizar.

Realizando estas acciones lo primero que se identificó es la falta de control del horno en cuanto a temperatura, consumo de combustible y presión de trabajo, dado que no se cuentan con instrumentos de medición pertinentes para censar estas variables, importantes para el proyecto, por lo que fue lo primero que se tuvo en cuenta a la hora de realizar las mejoras del proceso de forjado.

El proceso de forjado se realizaba de manera arbitraria, conforme a la experiencia del operario, dado que era él quien determinaba cuando una pieza tenía la temperatura para sacarla del horno y forjarla, como también era quien decidía que el horno ya se encontraba a la temperatura adecuada como para comenzar a introducir carga, guiándose con el código de colores para identificar temperaturas. Por lo que se identificó una oportunidad de mejora.

Las mediciones de caudal, dado la inexistencia de un instrumento de medición vinculado directamente en el horno, se realizaron directamente en el contador general de la empresa, dado que existen en tratamientos térmicos otros tres hornos que consumen gas natural se tuvieron las precauciones y se tomaron las medidas cuando solo estaba funcionando el horno de forjas, con un cronómetro y visualmente se observaba cuando el contador subía  $0,1 \text{ m}^3$ , con esto se tenía un estipulado de cuanto estaba consumiendo el horno en su funcionamiento.

Para terminar de concretar la fase de estudio previo se realizó una medición general cuando el horno estaba en funcionamiento y forjando varios elementos, en esta medición se utilizaron elementos para determinar la composición química de los gases de salida, la temperatura de las paredes del horno y de los gases de combustión en la chimenea, la temperatura y presión en sitio y la emisividad general del horno. También se mide la presión manométrica del gas antes del medidor, la presión

atmosférica del sitio y la temperatura ambiente, para llevar el caudal medido a condiciones estándar.

Para la medición de la composición química de los gases se usó un Analizador de gases Bacharach PCA3 de especificaciones mostradas en la tabla 6.

*Tabla 5. Especificaciones técnicas del analizador de gases Bacharach PCA3.*

Medición (basada en los sensores instalados)	Rango de visualización
Oxígeno	De 0.1 a 20.9%
Temperatura del gas de descarga de la chimenea	De -20 a 1200°C
Temperatura del aire ambiente	
Monóxido de carbono (CO)	De 0 a 4000 ppm
Presión/Tiro	±179 mb
Óxido nítrico (NO)	De 0 a 3000 ppm
Dióxido sulfúrico (SO <sub>2</sub> )	De 0 a 5000 ppm

La presión atmosférica del sitio y la temperatura ambiente se cuantificó con un Termohigrómetro CEM DT-171-T, con un rango de medición entre 0 y 100 % HR, -40 y 70 °C, una precisión de ± 2 % HR, ± 0.5°C y resolución de ± 0.1 % HR, ± 0.1°C. La presión atmosférica se midió con un Altimetro Thommen Classic Black con un rango de medición 0 m - 6000 m y 553 mmHg - 790 mmHg (737.3 mbar – 1053.2 mbar).

Para la medición de la temperatura de las paredes se usó un Pirómetro Fluke 568 que tiene un rango de medición de -40 a 800 °C y una precisión de < 0 °C (32 °F): ± (1,0 °C (± 2,0 °F) + 0,1°/1 °C o °F); > 0 °C (32 °F): ± 1 % o ± 1,0 °C (± 2,0 °F). También se contó con una cámara termográfica marca TESTO 885-2 de especificaciones mostradas en la tabla 7.

#### Tabla especificaciones cámara termográfica

Con estas mediciones y realizando los cálculos correspondientes se pretendía en primer lugar definir cuál era la potencia del horno, un parámetro que no se tenía estipulado y con esto ver cómo era la distribución de potencia en el sistema, es decir, como se disponía de la energía proveniente de la combustión, lo que gráficamente se mostró con un diagrama Sankey y guió el camino de cuales puntos eran los principales para el rediseño que se realizó.

Conociendo que las pérdidas de mayor porcentaje se daban por la transferencia de calor por conducción del interior del horno al exterior y por la energía que se llevaban los gases que salían por la chimenea a una temperatura demasiado elevada, se concentró en ayudar a mitigar estas pérdidas y cual debía de ser la mejor manera para hacerlo. Dado esto se concentró en primer lugar en determinar una temperatura

válida para tomar en el interior del horno, en este caso, la temperatura de llama adiabática, con el fin de tener una idea de a cuánta temperatura estaba al interior el horno y se realizaron los cálculos correspondientes para aislar adecuadamente cada una de las paredes del horno, con la premisa de seguir trabajando con los aislamientos que compra la empresa actualmente, como lo son los ladrillos refractarios SK-32 y la fibra cerámica SIS.

Para el correcto cálculo de este aislamiento se tuvo que proponer una geometría inicial del horno, para ir determinando áreas de transferencia de calor y guiar las bases del rediseño óptimo. Teniendo esto, se centró en las pérdidas que se generaban por las altas temperaturas que salían los gases en la chimenea y en qué sistema era el más adecuado para recuperar parte del calor que se disipaba en el ambiente.

Se llegó a que la mejor manera de aprovechar esta energía era mediante un precalentamiento de los elementos a forjar, pero como el fin del proyecto era diseñar un horno de forja que cumpliera con los requerimientos de producción, calidad, salud ocupacional, gestión ambiental y eficiencia energética de la empresa no se podía realizar un tratamiento térmico en el precalentamiento, como por ejemplo alcanzar temperaturas de revenido o alivio de tensiones, por lo que este parámetro se usó para el diseño del sistema de precalentamiento.

Finalmente, teniendo los diseños del horno y el sistema de precalentamiento se realizaron los cálculos teóricos para avalar que el horno que se diseñó cumple con los parámetros pactados y se definieron las diferentes adecuaciones para que el uso operacional sea más acorde a la salud ocupacional del operario encargado del área de forjas en la empresa.

Entre estos parámetros de salud ocupacional se establecieron los diferentes instrumentos de medición para el control adecuado de las variables, entre ellas la adecuación del circuito electrónico encargado de encender el horno, sensar la temperatura y dar un control on/off mediante el cierre o apertura de una electroválvula.

Teniendo claro los elementos del sistema se hicieron unas estimaciones de cuanto valdría el incorporar el proyecto para la empresa, además de calcular en cuanto tiempo se podría recuperar la inversión del proyecto gracias al ahorro de combustible.

## **6. Análisis y resultados**

### **6.1. Proceso de forja**

El forjado es uno de los procesos térmicos que han caracterizado a la empresa, que en sus comienzos se llamó servitemples y se ha dado a conocer en el ámbito local por los tratamientos térmicos de calidad que allí se realizan. La empresa cuenta con 4 hornos, 3 de ellos están ubicados en el sector de tratamientos térmicos y el horno de forjas que se encuentra en el sector de las prensas.



El horno que actualmente es el encargado de dar la temperatura para forjar se encuentra con varios puntos para mejorar, por lo que se centró en dar cuantificaciones, para demostrar numéricamente las especificaciones del horno, que de hecho no se encontraban en la empresa, dado que el diseño del horno fue concebido sin la información técnica adecuada.

La primera medición que se realizó fue en el contador general de gas de la empresa, allí se determinó cual era el caudal del horno. Las diferentes mediciones arrojaron un caudal de

$$Q = 5,5 \frac{m^3}{h}.$$

Con este dato se toma entonces las mediciones realizadas de temperatura, presión y humedad relativa en sitio para llevar el caudal a condiciones estándar, por lo que se llega a que:

$$Q_{st} = Q * \left( \frac{288 [K]}{T_{sitio}[K]} \right) * \left( \frac{P_{sitio} [KPa]}{101,3[KPa]} \right)$$

Dado que las mediciones de las condiciones atmosféricas del sitio son:

- Temperatura ambiente: 31,8 °C.
- Presión atmosférica: 84,4 kPa.
- Humedad relativa: 49,6 %.

$$Q_{st} = 4,85 \frac{m^3}{h}$$

También se referenció durante los primeros dos meses como era el comportamiento de forjas, y estimar cuanto era el funcionamiento por día o por semana de esta área de la empresa, dado que es el horno que tiene más fluctuación en su uso, y es una variable importante para los cálculos cuanto es el tiempo de uso del sistema.

Otra caracterización que se realizó fue el determinar cuánto se cargaba el horno cada vez que se calentaba, principalmente para saber los kilogramos de material que forjaba el horno en un determinado tiempo y el intervalo entre que entraba hasta que salía del horno listo para seguir al proceso de forjas. Estos datos se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8. Mediciones iniciales. Fuente: construcción propia**

Tiempo de uso	28 horas/semana
Carga promedio	8 kg
Tiempo promedio de proceso (Después de calentar la pieza)	38 s
Cilindro promedio	Φ1”x150 mm

Para seguir caracterizando el horno se realizaron mediciones en sitio, mientras el horno estaba funcionando, con diferentes equipos para determinar principalmente la potencia térmica del sistema y como se distribuía la energía en el horno, para identificar además las principales pérdidas.

La composición química del combustible, que en este caso es gas natural, corresponde a la reportada por la empresa Transportadora de Gas Internacional S.A. E.S.P. que se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Composición gas natural. Fuente: TIG**

Especie	Fórmula química	Composición en volumen (%)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,4227
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1,9344
Metano	CH <sub>4</sub>	82,8180
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	10,0770
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3,5393
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,5446
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,5091
i-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,1549
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0000
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,0000
Gravedad específica		0,6750
Poder calorífico superior (PCS, kJ/m <sup>3</sup> std)		42776

Las mediciones y los equipos fueron suministrados por el grupo de ciencia y tecnología del gas y uso racional de la energía (GASURE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, que mediante las termografías, temperaturas y el analizador de gases para el diagnóstico de la combustión se realizaron los cálculos pertinentes para llegar al diagrama Sankey del horno.

El balance de masa realizado por el grupo GASURE se muestra en la tabla 4, de allí se basan los cálculos de las pérdidas de calor en el sistema.

**Tabla 4. Balance de masa. Autoría grupo GASURE. Unidades [kg/h]**

	Especie	Fórmula química	Entrada	Salida
Combustible	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,025	---
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,177	---
	Metano	CH <sub>4</sub>	2,756	---
	Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,629	---
	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,324	---
	i-Butano	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,066	---
	n-Butano	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,000	---
	i-Pentano	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,023	---
	n-Pentano	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,000	---
	n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,000	---
	<b>Total combustible</b>		<b>4,0</b>	---
Oxidante	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	<b>51,55</b>	---
	Oxígeno	O <sub>2</sub>	<b>15,65</b>	---
Gases de combustión	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	---	1,66
	Monóxido de carbono	CO	---	0,02
	Hidrógeno	H <sub>2</sub>	---	0,00
	Oxígeno	O <sub>2</sub>	---	14,17
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	---	54,33
	Agua	H <sub>2</sub> O	---	1,24
	Monóxido de nitrógeno	NO	---	0,10
	<b>Total</b>		<b>71,2</b>	<b>71,5</b>

Las pérdidas asociadas a un proceso de combustión son principalmente:

- Por calor sensible en gases de combustión
- Calor latente de vaporización del agua
- Por combustión incompleta
- Por paredes

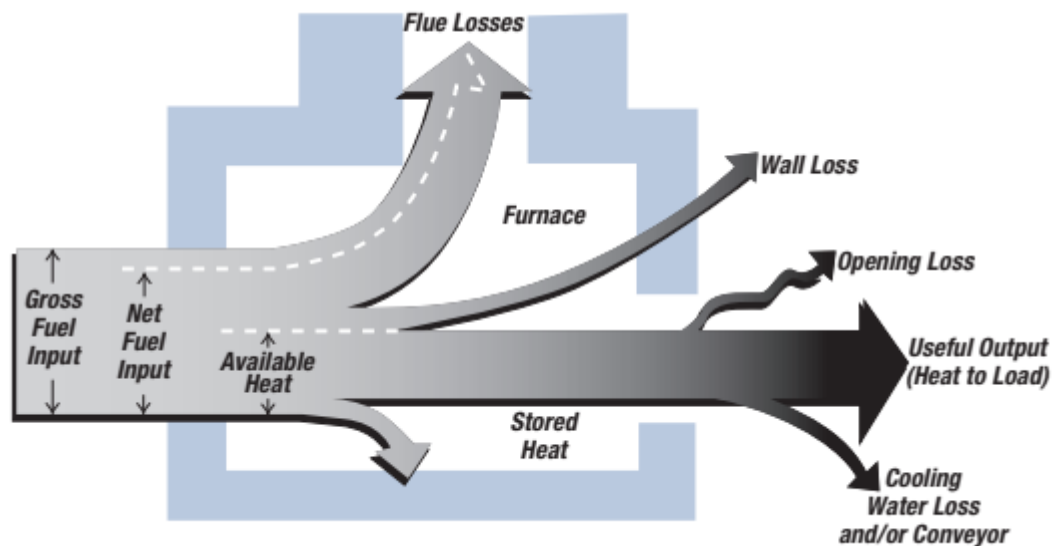
De esta manera el grupo GASURE entregó el diagrama Sankey del sistema, el cual se muestra en la figura 7 y es la base de la caracterización del horno que posee la empresa, y la guía de lo que posteriormente se mejoró en el diseño de un nuevo horno.

Para entender el diagrama, se debe aclarar cuáles son las pérdidas que ocurren en un sistema de combustión, estas pérdidas se muestran en la figura 6 y son las causales de que el calor que recibe la carga no sea la energía total que emite el combustible. Estas pérdidas son:

- Pérdidas en gases de combustión: Es la energía que los gases de combustión llevan fuera del sistema. Se contabilizan a partir del balance de masa y la temperatura de los gases en la chimenea.



- Pérdidas por paredes: Es la energía que se trasfiere a los alrededores del horno, por convección y radiación desde las paredes. Se cuantifica en función de la temperatura de las paredes y la geometría del horno.
- Pérdidas por apertura: Es la energía que se pierde cuando se abre o cierra una puerta o entrada, ya sea para cargar o descargar el horno.
- Pérdidas de calor latente del agua: Es la energía que el sistema entrega en evaporar el agua que se encuentra en la zona, de allí la importancia que juega la humedad relativa en estos casos.
- Pérdidas por combustión incompleta: Es la energía que no se aprovecha del combustible, puesto que no todo lo que entra al sistema reacciona, por tanto gases combustibles como lo son el dióxido de carbono o hidrocarburos en general se llevan la energía química dado que no combustionan en el proceso.



**Figura 5. Pérdidas de un sistema de combustión. Fuente: Improving Process Heating System Performance**

De este diagrama se observa que las principales pérdidas de energía están en el mal aislamiento del sistema y en la temperatura elevada con la que salen los gases por la chimenea, perdiendo la energía que se usó para llevarlos a esa temperatura.

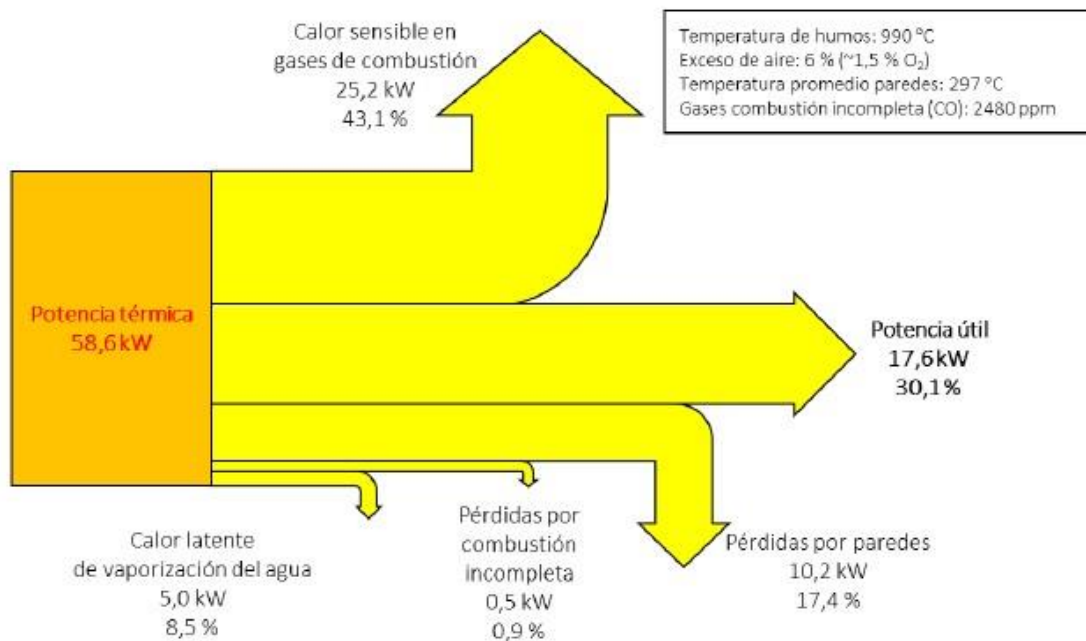


Figura 6. Diagrama Sankey horno forjas. Fuente: Construcción y autoría GASURE

Teniendo claro las premisas que se iban a mejorar en el diseño, se concentró en realizar los cálculos para el aislamiento correcto del sistema y en como recircular los gases de combustión para aprovechar la energía que poseen.

El horno actual se muestra en la figura 7. Allí se puede observar el porque las pérdidas por aislamiento y por calor sensible de los gases son los más altos, dado que el horno no se encuentra hermético y la energía se pierde por los distintos orificios que posee, entre ellos la chimenea y al darse esto la temperatura con la que los gases salen del sistema es muy elevada, dejando escapar la energía que llevo calentarlos al aire circundante, aumentando la temperatura del lugar y haciendo que el operario tenga unas condiciones laborales inapropiadas.

### Figura del horno de SISPRO

#### **6.2. Aislamiento.**

Para los cálculos de aislamiento se tuvieron en cuenta, además de lo ilustrado en el diagrama Sankey, que los objetos que actualmente usa la empresa para el aislamiento de los sistemas térmicos son los que se usarán para el diseño actual, dado esta premisa se procedió a dar un estimado de la temperatura interna a la que podría estar el horno, dato que no se logró medir en el diagnóstico.

Para esto se calculó la temperatura de llama adiabática, una temperatura teórica a la que llegan los combustibles según su composición. Por lo que se hizo la estequiometría con el porcentaje calculado de exceso de aire por el diagnóstico realizado por el grupo GASURE y la composición química reportada por TIG, haciendo la suposición de que los componentes butano (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>) y pentano (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>) se despreciaban para los cálculos por motivos de su poca concentración en la mezcla, dando como resultado:

Mediante un balance de energía, tomando que no hay trabajo ni transferencia de calor, adiabático, se llega a que la energía de los productos es igual a la liberada por los reactivos, de esta manera el balance queda:

$$\sum N_p * (\tilde{h}_f^0 + \tilde{h} - h^0)_p = \sum N_r * (\tilde{h}_f^0)_r \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$N_p =$

Con las entalpías de formación y realizando los cálculos mediante el método de ensayo y error se llegó a que la temperatura de llama adiabática para esa composición es de aproximadamente 2273 K ( $T_{ad} = 2000^\circ\text{C}$ )

Conociendo que la temperatura en la chimenea del horno era de unos  $990^\circ\text{C}$  se puede llegar a que la temperatura dentro del sistema no es  $2000^\circ\text{C}$  además de que este valor es un dato completamente teórico, se procede a trabajar con la temperatura del horno actual, para esto se usará las dimensiones y lo medido en el diagnóstico.

Con ayuda de la ecuación dos y con los materiales que se tiene se llega a que:

$$T_{interior} = \frac{\dot{Q}_{paredes} * K_L * A}{L_L} + T_{exterior}$$

Donde:

$T_{interior}$  = Temperatura de la pared interna.

$A$  = Área transversal de transferencia

$T_{exterior}$  = Temperatura exterior de la pared.

$L_L$  = Longitud de ladrillo cerámico

$K_L$  = Conductividad térmica del ladrillo

Realizando el cálculo para las paredes laterales y conociendo cuantos ladrillos están en el horno actual, es decir la longitud  $L$ , el área de las paredes y la temperatura externa del horno se procede a determinar un estimado de la temperatura de la pared del horno, reemplazando los valores se llega a que para la pared lateral al quemador y para la pared frontal a este la temperatura son respectivamente,  $1165$  y  $1215^\circ\text{C}$ .

Para la transferencia de calor mediante las paredes se usó el cálculo mediante resistencias térmicas, con la suposición de que la pared interior se encontraba a  $1250^\circ\text{C}$  y conociendo la pérdida por paredes de  $10,2$  kW diagnosticados se procedió mediante el software Excel hacer las iteraciones pertinentes para saber cuánta longitud de fibra cerámica SIS y de ladrillo refractario SK-32 era necesario para aislar correctamente el sistema.

$$\dot{Q}_{paredes} = \frac{T_1 - T_2}{\sum R} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:



$T_1$  = Temperatura de la pared interior del horno  
 $T_2$  = Temperatura de la pared exterior del horno  
 $R$  = Resistencias térmicas

Sabiendo las dimensiones comerciales del ladrillo (114x230x65 mm) y la fibra cerámica SIS se comercializa en espesores de 1/2", 1" y 2" se pauto una temperatura de 70°C en la parte exterior del horno y se despreció la resistencia térmica del acero, dado su espesor tan pequeño y su alta conductividad térmica.

Para las paredes con manta y ladrillo cerámico de realizó el balance con la ecuación 3, mientras que para la parte superior se realizó el rediseño de ubicar solo fibra cerámica SIS, dado que actualmente los problemas principales de mantenimiento en el horno se dan cuando por el constante uso y la fatiga térmica el refractario de la parte superior se desplomaba, causando obstrucciones en la llama, principalmente a la salida del quemador, lo que no permite calentar de manera correcta el volumen del horno. Para este caso de la pared superior se realizó el cálculo con la ecuación 4.

$$L_L = \left[ \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}_{paredes}} - \frac{L_m}{K_m * A} \right] * K_L * A \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

$L_L$  = Longitud de ladrillo cerámico

$L_m$  = Longitud de fibra cerámica SIS

$A$  = Área de la pared

$K_L$  = Conductividad térmica del ladrillo

$K_m$  = Conductividad térmica de la fibra

$$L_m = \left[ \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}_{paredes}} \right] * K_m * A \quad (\text{Ec.4})$$

El cálculo para encontrar la conductividad térmica del ladrillo SK-32 se realizó con la composición química, que se encuentra en la ficha técnica del componente y se muestra en la tabla 5, las conductividades de cada uno de los componentes se encontraron en la base de datos bibliográfica Knovel

**Tabla 5. Composición química y conductividad ladrillo SK-32**

Composición refractario	%	K	Unidad
Al2O3	0,405	5,8	W/mK
SiO2	0,54	1,8	W/mK
Fe2O3	0,021	0,586	W/mK
TiO2	0,021	3,3	W/mK
MgO	0,006	0,07	W/mK

Con ayuda de la ecuación 5 se llega a que la conductividad térmica del ladrillo es 3,4 W/mK, dato que no se encontraba en la ficha técnica.

$$K_L = \sum n * K_{material} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$K_{material}$  = Conductividad térmica de los compuestos que conforman el ladrillo

$n$  = Porcentaje en la composición química de cada elemento

La conductividad térmica de la manta es un dato que se encuentra en la ficha técnica con un valor de 1,73 BTU\*in/(h\*ft<sup>2</sup>\*°F) a una temperatura media de 815°C, que son 0,25 W/mK.

El área de transferencia de calor se estipulo desde diseño, teniendo un volumen semejante al existente, puesto que la longitud de llama que se tiene con el quemador de la empresa es uno de los puntos de inseguridad a la hora de operar el horno, dado que la llama sale por los orificios destinados para ubicar la carga e incluso por la chimenea del horno.

El resultado del aislamiento permitió una pérdida por paredes de 5915 W, lo que traduce en una mejora de 5098 W en el diagrama de potencias del horno o un porcentaje de 50% con respecto al actual. Porcentaje que se aprovecharía como potencia útil para calentar la carga.

Las demás consideraciones de diseño que se le realizaron al horno fueron estipuladas por los operarios y por las constantes observaciones que se hicieron a lo largo de la práctica, que van a permitir una mejor condición de trabajo y más facilidad a la hora de forjar. El diseño se muestra en los anexos

### 6.3. Calentamiento Horno.

Conociendo el horno actual, y teniendo el diseño del horno que se realizó se puede dar un estimado de cómo va a ser el tiempo de calentamiento de cada uno de los hornos, y comparar ambos sistemas para ver qué tan viable es la propuesta de cambiar de horno. Este análisis es para determinar el transitorio de cuanto tiempo se demora en calentar el horno, sin tener carga, que es lo que normalmente se realiza en la cotidianidad de la empresa.

Para este análisis se basó en la potencia que se adquirió del aislamiento, la masa del horno y los componentes del horno. La ecuación 6 fue la que se usó para el análisis, despejando la temperatura en función del tiempo.

$$P_t = m * Cp * \frac{\Delta T}{\Delta t} * n \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$P_t$  = Potencia térmica

$m$  = Masa del horno

$C_p$  = Calor específico  
 $\Delta T$  = Delta de temperatura  
 $\Delta t$  = Delta de tiempo.  
 $n$  = Eficiencia del horno

Solucionando para la temperatura y sabiendo que se parte desde un tiempo inicial igual a cero se llega a que:

$$T = T_i + \frac{P_t}{m * C_p * n} * t$$

Donde

$T_i$  = Temperatura inicial de la pieza.

La masa del diseño la dio el software Inventor, utilizando las densidades respectivas de los materiales que se usaron. Para hallar el  $C_p$  de cada horno se usó la ecuación 7, y con ayuda del software Excel se graficó el tiempo de calentamiento para ambos sistemas, que se muestran en las gráficas siguientes.

$$C_{P\ Total} = \frac{m_{Manta}}{m_{Total}} * C_{P\ Ladrillo} + \frac{m_{Ladrillo}}{m_{Total}} * C_{P\ Ladrillo} + \frac{m_{acero}}{m_{Total}} * C_{P\ Acero} \quad (Ec. 7)$$

Donde:

$C_{P\ Total}$  = Calor específico del Horno

$m_{Manta}$  = Masa fibra cerámica

$m_{Ladrillo}$  = Masa ladrillo refractario

$m_{acero}$  = Masa de acero

$m_{Total}$  = Masa total del sistema

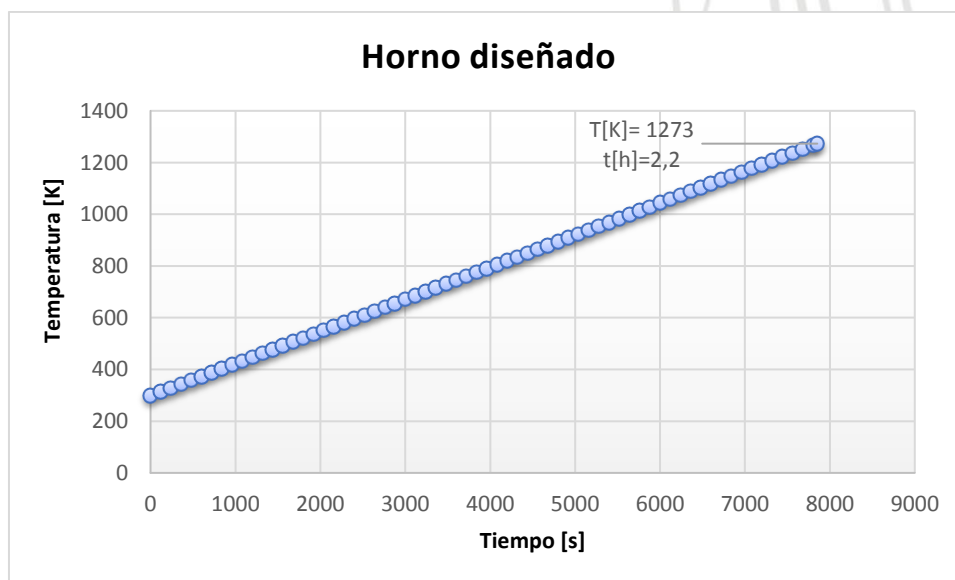


Gráfico 1. Calentamiento horno diseñado. Fuente: Construcción propia



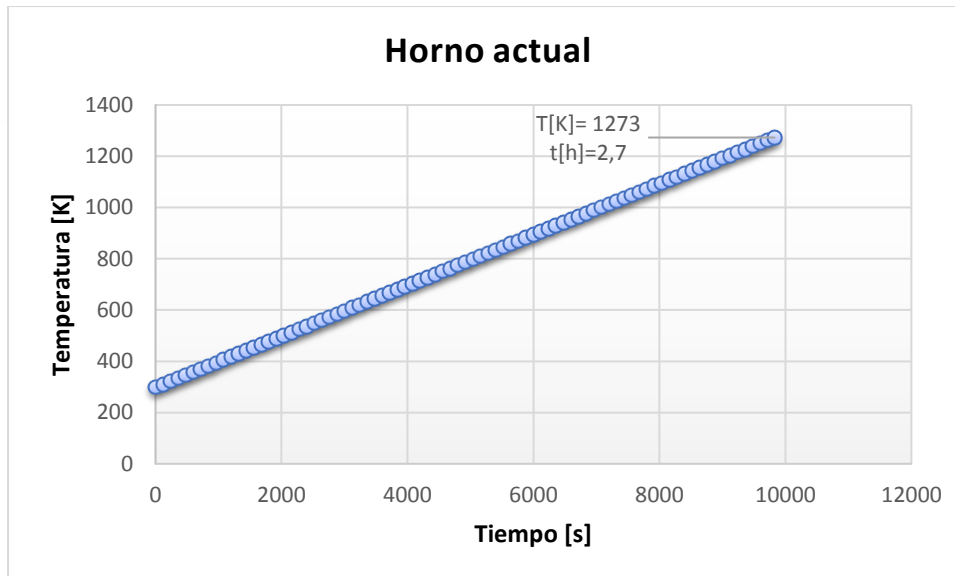


Gráfico 2. Calentamiento horno actual. Fuente: Construcción propia.

Se observa que para llegar a un igual de temperatura en ambos sistemas hay una diferencia de 0,5 horas, lo que traduce un total de 30 minutos menos de precalentamiento del horno y en gastos volumétricos de combustible un ahorro de 2,75 metro cúbicos de combustible por cada encendida y puesta a punto del horno.

#### 6.4. Calentamiento pieza

Para el calentamiento de las piezas en el horno se usará el mismo procedimiento de cálculo, sabiendo que se aumentó puntos en potencia útil mediante el aislamiento, pero manteniendo las mismas premisas, es decir, el calor específico será el mismo, en este caso el del acero, la misma eficiencia y se va a calentar la misma masa, que en promedio es la que se calienta en forjas, un total de 8 kg por tanda de calentamiento de aproximadamente 900 °C.

Dado esto las gráficas siguientes arrojan el tiempo de calentamiento para llegar a una misma temperatura de ambos sistemas.



Gráfico 3. Tiempo de calentamiento de pieza en horno diseñado. Fuente: Construcción propia.

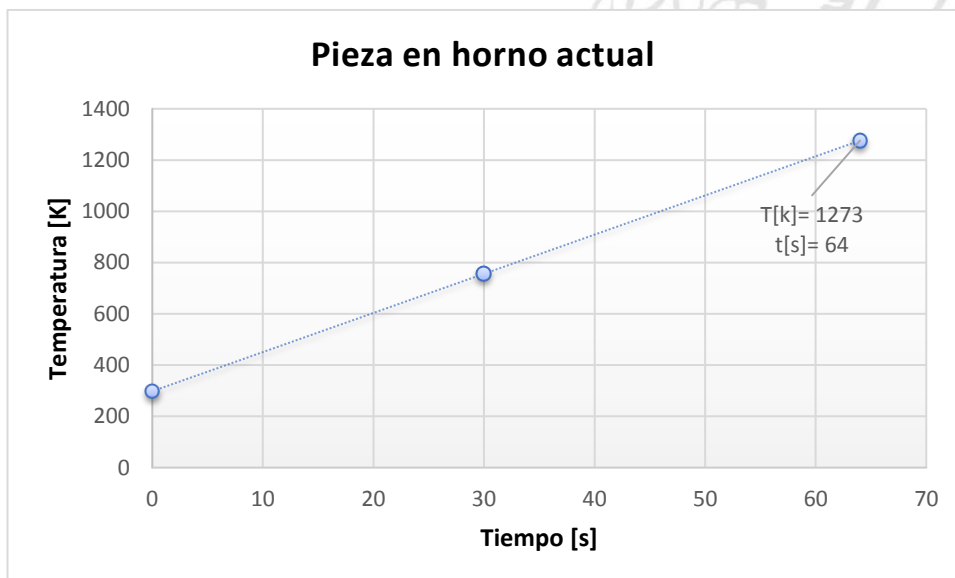


Gráfico 4. Tiempo de calentamiento de pieza en horno actual. Fuente: Construcción propia.

Aparte de ver la diferencia de tiempos para llegar a la misma temperatura, que es de 22 segundos, se observa desde la experiencia que se adquirió en la empresa que para una carga de aproximadamente 8 kg el horno se puede estar tardando unos 15 minutos para llegar al tiempo de forjado, según estima el operario que es el que según el código de colores y su experiencia quien decide cuando retirar las piezas para pasar a forjarlas, por lo que se hizo la estimación de para cual potencia se estimaba aproximadamente este tiempo.

Se realizó el análisis de esta manera dado que se estima que gran parte de la potencia se está utilizando solo en calentar el espacio interior del horno, mas no en potencia útil para calentar la pieza, dado esto se llegó a que un décimo de la potencia aparentemente útil es la que lleva a un tiempo de calentamiento de 15 minutos aproximadamente como lo muestra en el gráfico 5.

Expuesto esto se considera el añadir mucha más carga de la que actualmente se está poniendo en el horno puesto que el añadir más carga no afectaría el tiempo de calentamiento de esta y se aprovecharía de mejor manera la potencia útil que existe en el interior del horno y el volumen de espacio calentado por el proceso de combustión.

Aunque otra de las posibles causas del problema, además de las pérdidas por abertura de puertas y las pérdidas por el constante enfriamiento que realiza un ventilador el cual el operario ubica en dirección al horno, perdidas que se muestran en la figura 5, sea la incertidumbre en la medición del caudal de combustible, aunque se midió varias veces dando un promedio de 5.5 metro cubico por hora, puede que este valor sea para determinada carga o que existan fugas en la red de aire y que constantemente el contador este marcando estas fugas o la repentina puesta en marcha de algún otro horno durante las correspondientes mediciones.

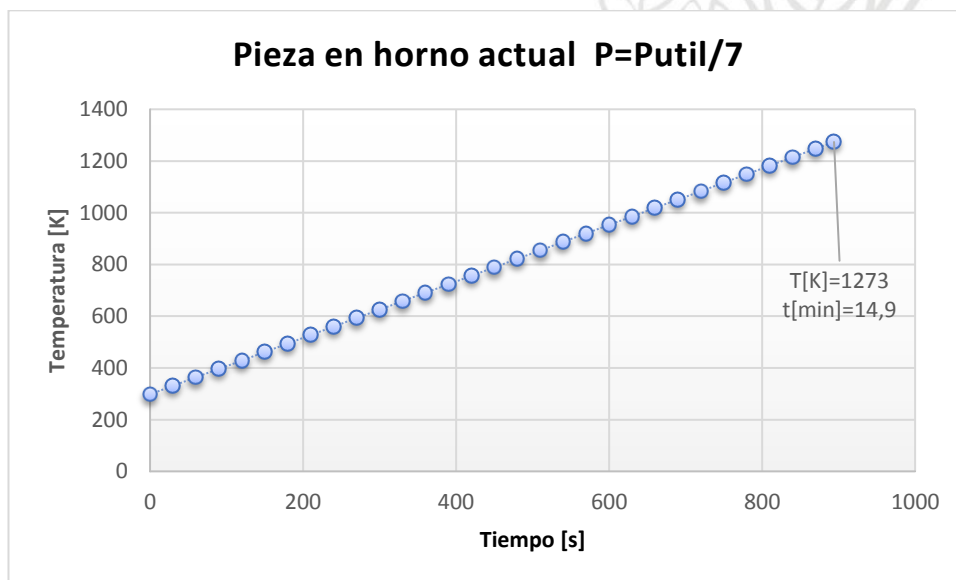


Gráfico 5. Potencia real de calentamiento. Fuente: construcción propia.

Otra de las posibles incertidumbres es que el operario cuando en realidad retira las piezas del horno, estas se encuentran a una temperatura mayor a la recomendado, dado esto entonces se transfiere mayor energía a las piezas de lo que necesitan, dando esto otra pérdida por exceso de energía. Pérdida que se puede mejorar si se tiene un control de temperatura del horno.

## 6.5. Precalentamiento

El sistema de precalentamiento se diseñó teniendo en cuenta que la mayor pérdida de energía es el calor de los gases de combustión, en este sistema se pretende llevar la carga de la temperatura ambiente a un máximo de 200°C, parámetro que se fijó con la empresa, dado que a partir de ese valor se puede tratar térmicamente



el material si se continúa aumentando su temperatura, afectando la calidad del producto que va salir a respaldar el nombre de la empresa.

$$P_u = P_t * n \quad (\text{Ec.8})$$

Donde

$P_u$  = Potencia útil

$P_t$  = Potencia térmica

$n$  = Eficiencia del horno de precalentamiento

Dado que no se sabe cuál va a ser la eficiencia de este sistema, se supone la misma que la del horno actual, es decir, treinta por ciento (30%). La potencia térmica por su parte para este sistema sería la potencia con la que sale los humos del horno de forjas, que según los cálculos es de 25,2 kW. Por tanto:

$$P_u = 7,56 \text{ kW}$$

Sabiendo la temperatura a la que se debe precalentar se llega a que la energía térmica necesaria es de:

$$E = m * C_p * \Delta T = 8[\text{kg}] * 0,48 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] * (200 - 25)[\text{K}] = 672 \text{ kJ} \quad (\text{Ec. 9})$$

Con la eficiencia planteada y la potencia y la energía térmica necesaria se llega a que

$$t = \frac{672 \text{ KJ}}{7,56 \text{ kW} * 0,3} = 296,3 \text{ s} \quad (\text{Ec.10})$$

. Por tanto a una carga de 8 kilogramos de acero le tomará un aproximado total de 5 minutos en subir de la temperatura ambiente a 200°C. Se aclara que se debe tener un control de en cuanto puede llegar a subir el material debido a que por irreversibilidades o simplemente variación en la masa que se carga al horno puede llevar más o menos tiempo, por tanto para tener una idea se deja el tiempo estimado por kilogramo de acero.

$$t = \frac{296,3}{8} = 37 \text{ s}$$

Este tiempo es teórico, puesto que en la realidad puede que surjan varias pérdidas de potencia en el sistema de precalentamiento como las hay en el horno, por lo que se sujeta este sistema a una examinación práctica para definir el tiempo de exposición de la carga para no superar los 200°C.

Este sistema se aisló solo con manta cerámica y tiene dimensiones máximas de 228x518x268 mm, por lo que debe ser capaz de contener la mayoría de los elementos que se forjan en SISPRO.

## 6.6. Simulación de Sistema de Control

La simulación del sistema de control de temperatura para el horno industrial de la empresa SISPRO S.A se realizó en el software de simulación de circuitos electrónicos



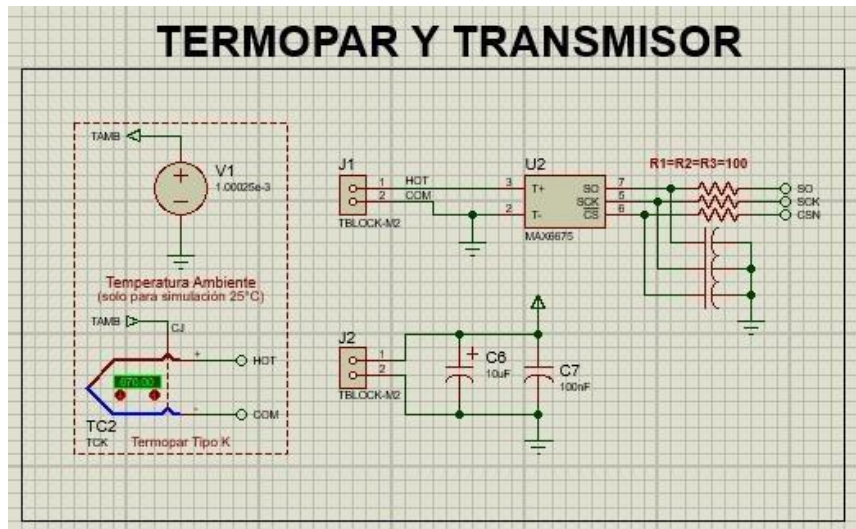


Figura 8. Adquisición del Sistema de Control. Fuente:elaboración propia en Proteus.

Los valores de los condensadores y las resistencias no son completamente necesarias, una conexión directa en la práctica conseguiría los mismos resultados, ya que se trata de una simulación dichos elementos son obligatorios para que dentro del software las corrientes no desborden cierto bloque de programación interno, es decir que son puro protocolo de conexión y no se tratan entonces que agregan una resistencia mínima al cable y no representan el sistema real.

De nuevo, con fines de simulación, se agrega un valor para la temperatura ambiente como una fuente con un valor aproximado de 1 mV, lo que corresponde a unos 25°C.

Cuenta con los siguientes elementos:

- 1 Termopar Tipo R.
- 1 Transmisor MAX6675.

## 6.8. Visualización y entradas

### 6.8.1. Panel Principal

Los elementos que componen esta etapa son los que corresponden a la visualización y la configuración del proceso, sin incluir los de paro de emergencia pues aunque se agregaron en una etapa diferente, también se encontrarán en la práctica ubicados sobre el panel principal del gabinete primario que posee el horno.



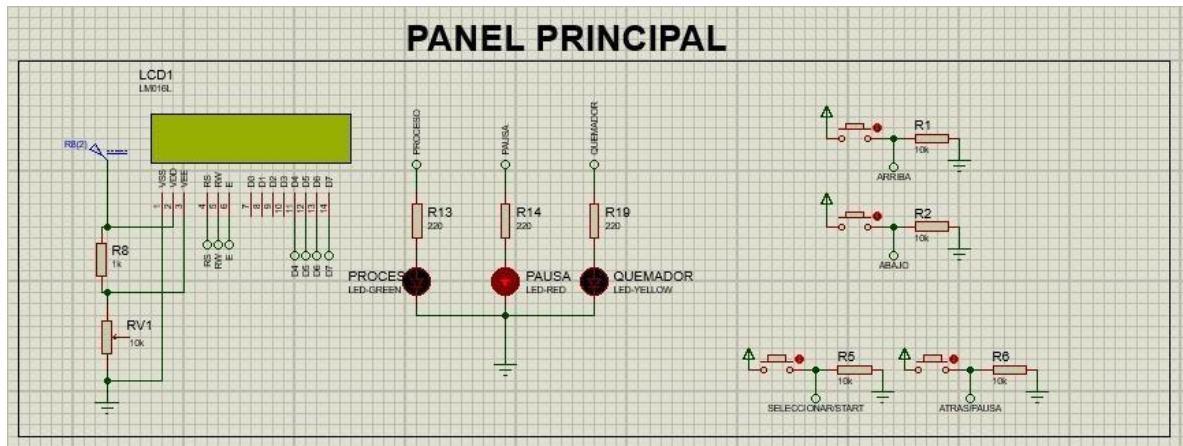


Figura 9. Panel Principal del Sistema de Control. Fuente: elaboración propia en Proteus.

Cuenta con los siguientes elementos de visualización:

- 1 Pantalla LCD de 16x2 Bits.
- 4 Indicadores LED para los estados de PROCESO, CALENTADOR, PAUSA, PARO DE EMERGENCIA
- 2 Pulsadores tipo Push para modificar la temperatura de entrada.
- 2 Pulsadores tipo Push para Iniciar o Pausar el Horno.

### 6.8.2. Controlador

Los elementos que componen esta etapa son únicamente dos, un pulsador de reset para el controlador, que resulta equivalente a apagar y encender el mismo, solo que sin las consecuencias de desenergizar y energizar de nuevo desde la alimentación misma.

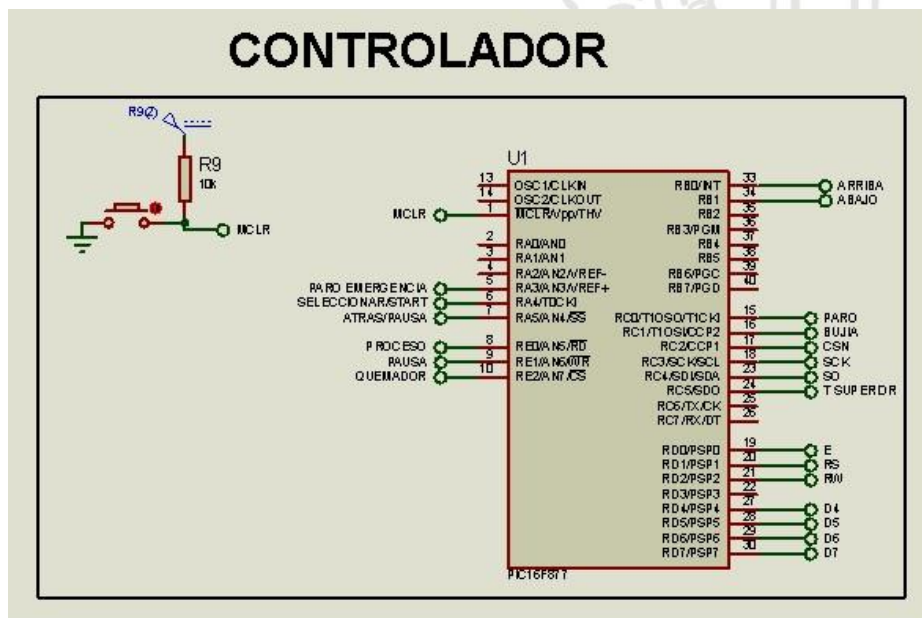


Figura 10. Controlador del Sistema de Control. Fuente: Elaboración propia en Proteus.

Cuenta con los siguientes elementos:

- 1 Microcontrolador PIC16F877

Cuenta con las siguientes entradas en los respectivos Pines:

- Pulsador PARO EMERGENCIA - A3

- Pulsador SELECCIONAR/START - A4
- Pulsador ATRÁS/PAUSA - A5
- Pulsador ARRIBA - B0
- Pulsador ABAJO - B1
- Transmisor de Temperatura - C2 - C3 - C4

Cuenta con las siguientes salidas en los respectivos Pines:

- Indicador PARO - C3
- Indicador PROCESO - E0
- Indicador PAUSA - E1
- Indicador QUEMADOR- A2
- Pantalla LCD - D0 - D1 - D2 - D4 - D5 - D6 - D7
- Zumbador de Alarma Temperatura - C5
- Señal de Control Final - Quemador a modo de Bujía - C1

### 6.8.3. Quemador - Elemento Final de Control - Actuador

Los elementos que componen esta etapa van a variar dependiendo de la implementación, con fines de simulación se ha puesto una salida cuyo valor se mantiene en alto, en estado activo cuando la temperatura deseada es inferior a la actual.

La Señal de Control Final representa la información que corresponde al elemento final de control, se debe realizar algún tipo de acople o acondicionamiento para manipular el elemento actuador, puede incluso tratarse para diferentes actuadores, por ejemplo, se puede cerrar una electroválvula encargada de la alimentación del gas para el Blower, también con la misma señal se puede apagar o encender el motor, ya sea utilizando una Bujía directamente o interviniendo el quemador.

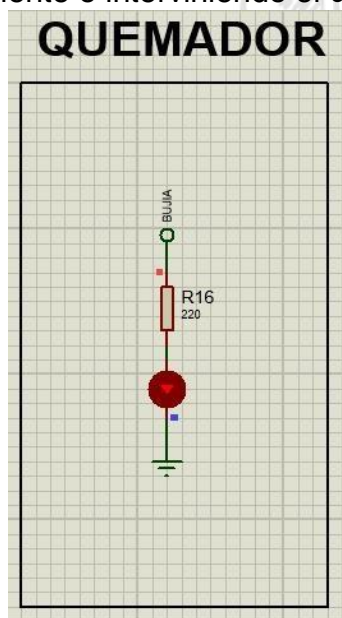


Figura 11. Elemento final de control o actuador del Sistema de Control. Fuente: elaboración propia en Proteus.

Cuenta con los siguientes elementos:

- 1 Bujía representado por un indicador para el encendido del Quemador.

### 1.1.1.1 Alarmas y paro de emergencia

Los elementos que componen esta etapa cuenta con los siguientes elementos:

- 1 Pulsador para el paro de emergencia.
- Dos indicadores de sonido para el paro y el estado de pausa.
- Un indicador lumínico para el paro.

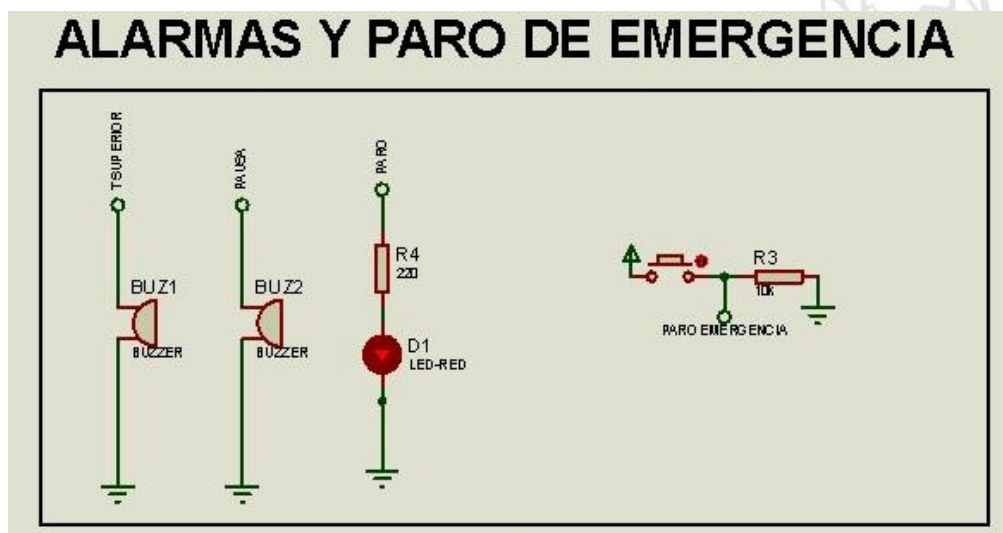


Figura 12. Alarma y paro

## 6.9. Costeo.

El precio del sistema es una variable importante para decidir cuan viable económicamente es el proyecto, puesto que en la industria las inversiones se miden principalmente en tiempos de retorno a una inversión determinada, con esto entonces en primer lugar se hace el costeo de cada elemento que compone el sistema, que se muestra diligenciado en la Tabla 7, algunas cantidades se cotizan por unidad y otras por kilogramos de pieza, además de contar algunos mecanizados como lo es el rolado de la pieza superior del horno.

Tabla 6. Costo de implementación del proyecto. Fuente: Construcción propia.

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Ladrillo refractario SK-32	156	\$ 5.300,0	\$ 826.800,0
Fibra cerámica SIS 7200x610 de B6 - 1"	1	\$ 110.000,0	\$ 110.000,0
Fibra cerámica SIS 7200x610 de B6 - 2"	1	\$ 180.000,0	\$ 180.000,0
Concrax 1500 (saco x 25 kg)	4	\$ 2.900,0	\$ 11.600,0
Recto STD IFB-23	5	\$ 6.500,0	\$ 32.500,0
Acero inoxidable 310 para horno	308 kg	35000/kg	\$ 10.780.000,0
Acero inoxidable 310 para precalentamiento	45 kg	35000/kg	\$ 1.575.000,0
Rolado parte Superior	1	\$ 115.000,0	\$ 115.000,0
Ángulo de 2" de 1/4" de espesor por 6 metros	1	\$ 67.138,0	\$ 67.138,0
Bujía	1	\$ 25.000,0	\$ 25.000,0
Botón pulsador	5	\$ 600,0	\$ 3.000,0
Diodo emisor LED	5	\$ 600,0	\$ 3.000,0



Zumbador electrico	2	\$ 1.500,0	\$ 3.000,0
Termocupla tipo K	1	\$ 20.000,0	\$ 20.000,0
Microcontrolador PIC16F877A	1	\$ 25.000,0	\$ 25.000,0
Transmisor electrónico	1	\$ 15.000,0	\$ 15.000,0
Pantalla LCD 16x2 bits	1	\$ 10.000,0	\$ 10.000,0
Electroválvula para gas natural	1	\$ 120.000,0	\$ 120.000,0
Printed Circuit Board, PCB	1	\$ 30.000,0	\$ 30.000,0
Anclaje refractario	76	\$ 1.500,0	\$ 114.000,0
Total			\$ 14.066.038,0

Los anclajes para la manta cerámica se estimaron por el área de contacto que se debe anclar que es un total de 3,63 metros cuadrados, y por recomendaciones del proveedor de tener 19 anclajes por metro cuadrado, dando un total de 76 unidades.

La placa de circuito impreso (PCB) es el precio de poner el circuito es una superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora.

Esta cotización no contempla los mecanizados que llevan algunas piezas ni los tiempos de proceso que acarrea el montaje y soldadura de los elementos, por lo que el precio final podría ser mayor, además de que algunos precios pueden variar conforme pasen los días para su compra, debido a la inflación normal de los productos .

El principal costo del proyecto es implementar el acero inoxidable 310 como base de todos los elementos metálicos, dado que es un material muy costoso en comparación con otra gama de aceros, haciendo la analogía con el acero ASTM A36, de precio aproximado de 2900 \$/kg se llega a un precio final de \$2.740.538,0. Precio que es más accesible para la inversión inicial.

El tiempo de retorno a la inversión se calculará mediante el ahorro energético que daría la implementación del proyecto, mostrado en los gráficos 1 y 3 y calculado en la siguiente sección.

### 6.9.1. Ahorro y Tiempo de retorno a la inversión.

El tiempo de ahorro del proyecto se cuantificará basándose en el precio que actualmente se paga por metro cúbico de combustible y en cuanto ahorra el proyecto en metro cubico de combustible por tiempo utilizado. Dado que la estimación del tiempo de uso en forjas es una variable que no se tiene con certeza, puesto el fluctuante uso que se le da a este horno, se estimará el ahorro por día de trabajo promedio.

Como muestra el gráfico 1, el ahorro en encendida y puesta en marcha del diseño es de 0.5 horas, es decir 30 minutos, dado esto entonces el ahorro será de:

$$\text{Ahorro} = \dot{m} * (t_{\text{actual}} - t_{\text{diseño}}) = 4,9 \left[ \frac{m^3}{h} \right] * (2,7 - 2,2)[h] = 2,45 m^3 \quad (\text{Ec. 11})$$

Con la ganancia que se obtuvo con el aislamiento en cuanto a potencia útil para calentamiento también se puede dar un estimado de cuanto más rápido calentaría una pieza. Dado lo que se expuso en la sección calentamiento pieza, de cómo realmente la potencia útil que más se acomodaba a las ecuaciones era la séptima parte de la potencia útil que se había calculado desde el diagnóstico.

Expuesto esto el análisis del tiempo que llevaría el calentamiento se debe hacer con lo que realmente se está tardando, dado esto se gráfica en cuanto tiempo calentaría el horno diseñado usando una séptima parte de la potencia útil, además de aclarar que en el tiempo que se tiene presupuestado calentar 8 kg, el horno diseñado tiene la capacidad de calentar 16 kg, puesto que en el diseño así se contempló. La gráfica 6 y 7 muestra los resultados para un calentamiento de 1 kg de carga de ambos hornos.

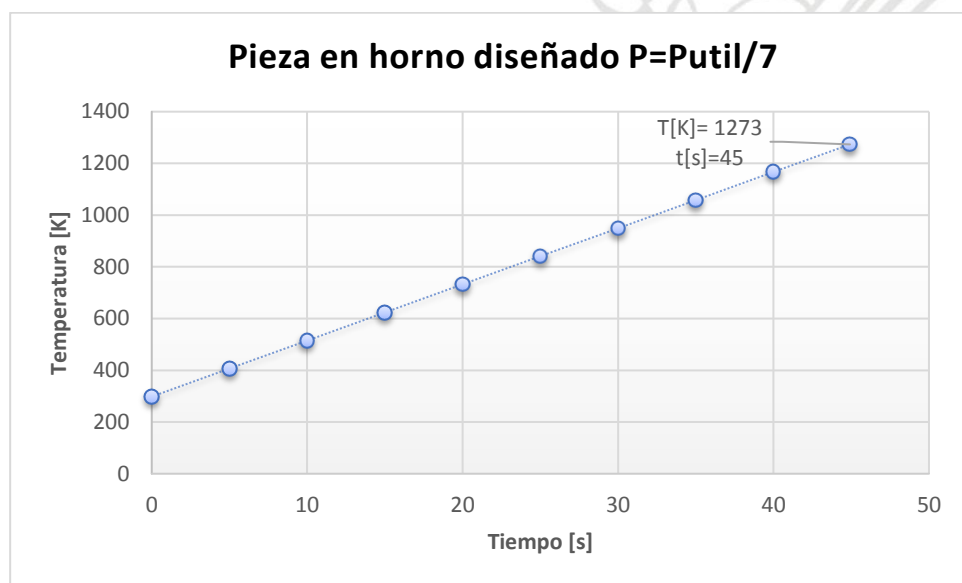


Gráfico 6. Calentamiento pieza en horno diseñado a  $1/7 P_{\text{util}}$ . Fuente: construcción propia

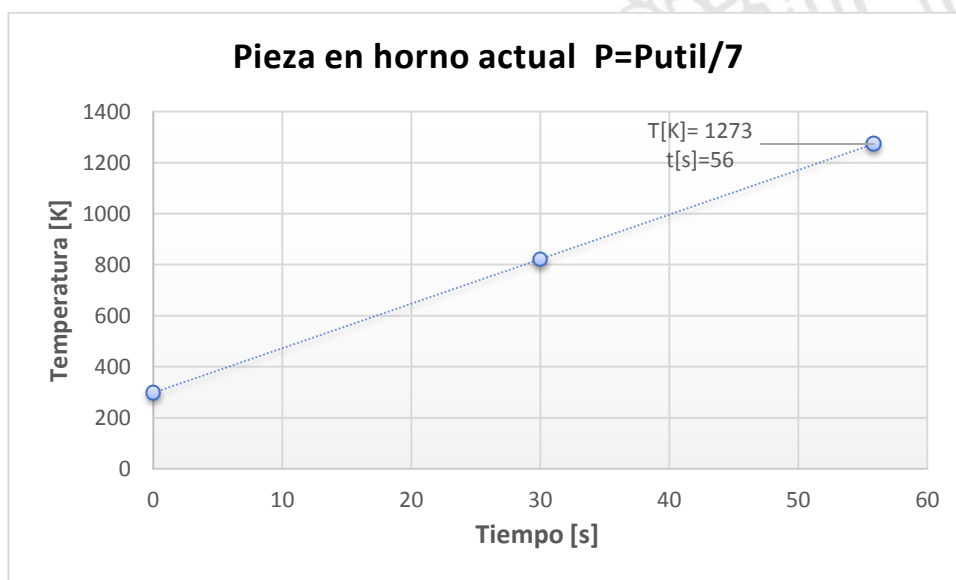


Gráfico 7. Calentamiento pieza en horno actual a  $1/7 P_{\text{util}}$ . Fuente: construcción propia.

Con ayuda de estos gráficos y con la ecuación 11 se llega a que por kilogramo el ahorro es:

$$\text{Ahorro} = 4,9 \left[ \frac{m^3}{h} \right] * \frac{(56 - 45)}{3600} [h] = 0,015 \frac{m^3}{kg}$$

Si en una semana promedio se usa el horno 28 horas, al día serían 5,6 horas, de las cuales se procesan un total de 6 a 8 cargas de aproximadamente 8 kilogramos cada una se llega a:

$$0,015 \frac{m^3}{kg} * 8 \frac{kg}{carga} * 7 \frac{cargas}{al\ día} = 0,84 \frac{m^3}{al\ día}$$

Cada día el horno se debe prender, por lo que el ahorro calculado en la ecuación 8 se le debe sumar al que se calculó anteriormente, así por día promedio el ahorro total sería de:

$$\text{Ahorro día} = 0,84 + 2,45 = 3,3 \frac{m^3}{al\ día}$$

De la última factura a la que se tuvo acceso de la empresa, se vio que el valor del metro cubico cobrado por EPM era de \$ 1399,5, teniendo esto entonces se puede estimar un año hábil de 246 días, como los tiene este año 2019 y se llega a que anualmente hay un ahorro de:

$$1399,5 \frac{\$}{m^3} * 3,3 \frac{m^3}{al\ día} * 246 \frac{días}{al\ año} = 1.136.114,1 \frac{\$}{año}$$

Con una inversión inicial de 14 millones de pesos, con ingresos anuales de \$1.136.114,1 y egresos estimados de \$125.000, el flujo de caja constante es de \$1.011.114. Luego de calcular la tasa interna de retorno (TIR) esta arroja un valor de 0,08%, lo cual indica que el valor de retorno de la versión inicial de 14 millones de pesos, tiene un valor porcentual para retorno de la inversión, ya que es positivo.

Con lo anterior se halla que el valor anual neto (VNA) o valor presente neto (VNP) con una tasa de interés del 0,08% la utilidad en el año 0 del inversionista sería \$972.757,8 y recuperaría el total de la inversión en 15 años de producción, si se mantiene la producción que actualmente realiza la empresa.

## 7. Conclusiones

El prediseño y análisis de los sistemas energéticos es fundamental a la hora de realizar un montaje de un sistema de combustión, dado que los factores que pueden

afectar la salud ocupacional, la eficiencia, la producción y demás variables de estudio en casos de este tipo, son importantes para dar un buen uso de la energía.

El estudio técnico de un sistema de combustión debe ser la base para su diseño, dado que en Colombia es un área donde la información técnica se ha dejado de lado y se diseñan sistemas a partir de conocimientos experimentales del tema, dando como resultado hornos ineficientes y contaminantes.

Es importante en el ámbito industrial tener mediciones constantes de los procesos de combustión para encontrar posibilidades de mejora y además contribuir al medio ambiente y esto se hace con equipos de medición calibrados y teniendo los respectivos sensores individualmente para cada sistema.

La viabilidad económica de un proyecto es importante cuantificarla para demostrar que una inversión es adecuada, en este caso además de ganar puntos en eficiencia y ahorro de combustible se logró mejorar la cantidad de piezas que pueden ser forjadas en un determinado tiempo, aumentando la producción al doble de la actual.

La potencia que aparentemente es útil en el horno no es aprovechada dado que el volumen de calentamiento de las piezas es muy pequeño con relación al volumen total del horno, por lo que la potencia que se puede utilizar se disipa en el interior de este generando más pérdidas en el sistema.

El quemador que se tiene actualmente en la empresa, que es la entrada de potencia térmica, se encuentra con un exceso de potencia para la labor que se desea corregir, por lo que si se decidiera cambiar el quemador o el sistema de aireación se recomendaría disminuir la potencia del sistema y con esto el volumen del horno, para hacer el sistema más compacto y aprovechar de la mejor manera el espacio caliente al interior del sistema.

### **Agradecimientos:**

Se agradece a las personas que colaboraron en el proyecto durante el semestre que se realizó, mis asesores de práctica, como a la empresa SISPRO y al grupo de ciencia y tecnología del gas y uso racional de la energía (GASURE) y en particular a:

- Andrés Felipe Mejía (Estudiante de ingeniería)
- Sofía Palacio Gómez (Estudiante de ingeniería)
- Mauricio Henao (Estudiante de ingeniería)
- Fabián Mora (Ingeniero Mecánico SISPRO)
- Freddy Muñoz (Operario forjas SISPRO)
- Camilo Echavarría (Ingeniero Mecánico grupo GASURE)



## 8. Referencias Bibliográficas

### 8.1. Revistas

- Martínez Camilo, Cardona Mario y Arrieta Andrés. Diseño y construcción de un quemador de aire inductor. Vol 24. Diciembre 2001.

### 8.2. Libros

- Yunus Cengel. Transferencia de Calor y Masa. Tercera Edición. 2006
- Yunus Cengel. Termodinámica. Séptima Edición. 2012.
- Frank P. Incropera. Transferencia de Calor. cuarta edición. 2014.

### 8.3. Cibergrafía

- Balseiro, J y Quintero, Y.(2012) Diseño y Construcción para la Sinterización de Materiales Metálicos Aleados Mecánicamente. Bucaramanga, Colombia. UPB. Recuperado de:

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1893/digital\\_22266.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1893/digital_22266.pdf?sequence=1)

- Aguirre, P y Sanchez, B. “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA EL CALENTAMIENTO DE PREPOLYMER Y POLYOL EN LA ELABORACIÓN DE CALZADO PARA LA EMPRESA CALZADO CASS. Cotopaxi, Ecuador. Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga.

Recuperado de:

<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/8301/AC-ESPEL-EMI-0255.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Perez, F y Soto, A.(2009). “DISEÑO, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO TIPO BASCULANTE Y SUS MOLDES”.

Pamplona Colombia. Universidad de Pamplona. Recuperado de:

[http://www.academia.edu/8082546/DISE%C3%91O\\_C%C3%81LCULO\\_Y\\_CONSTRUCCI%C3%93N\\_DE\\_UN\\_HORNO\\_DE\\_FUNDICI%C3%93N\\_DE\\_ALUMINIO\\_TIPO\\_BASCULANTE\\_Y\\_SUS\\_MOLDES](http://www.academia.edu/8082546/DISE%C3%91O_C%C3%81LCULO_Y_CONSTRUCCI%C3%93N_DE_UN_HORNO_DE_FUNDICI%C3%93N_DE_ALUMINIO_TIPO_BASCULANTE_Y_SUS_MOLDES)

- Escuela de Artes Universidad del Salvador.(2013). Manual de hornos a gas con tecnología apropiada.San Salvador, El Salvador. Recuperado de :

<http://ri.ues.edu.sv/6000/2/Manual%20de%20Hornos%20ceramicos%20a%20Gas.pdf>  
[https://www.as-sl.com/pdf/tipos\\_gases.pdf](https://www.as-sl.com/pdf/tipos_gases.pdf)  
[http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio\\_sin\\_paredes/fac\\_ing/Manu\\_cald/cap/11.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Manu_cald/cap/11.pdf)

- Resolución 127 de 2013. (2013). Régimen jurídico. Recuperado de:  
[http://regimenjuridico.gasnaturalfenosa.com.co/ver\\_leyes.php?id=142](http://regimenjuridico.gasnaturalfenosa.com.co/ver_leyes.php?id=142)

- Martinez, J. (2016).DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UN HORNO CON CONTROL DE TEMPERATURA PARA MOLDEO PLASTICO. Bogotá, Colombia. Universidad de la Salle. Recuperado de:

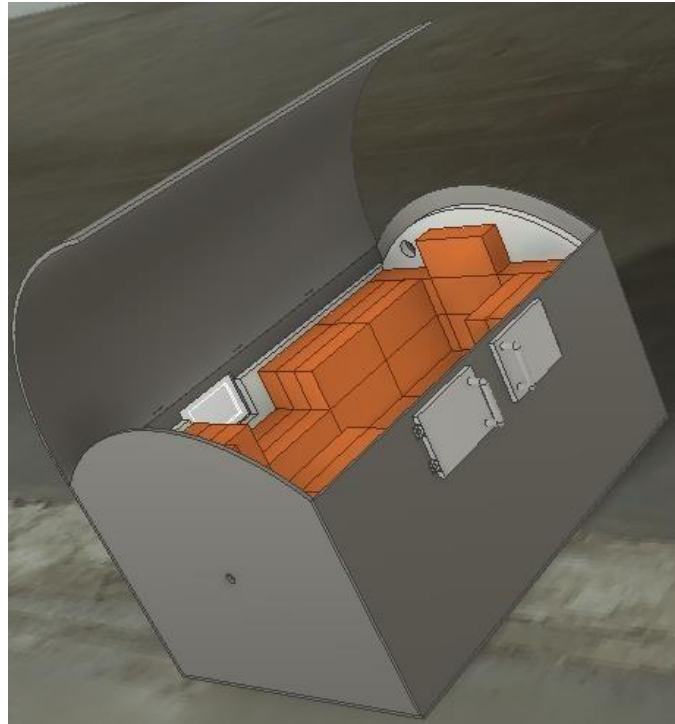
[http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/21206/45101330\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/21206/45101330_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Gonzales, J. (2016). DISEÑO DE UN HORNO INDUSTRIAL PARA EL MEJORAMIENTO DE UN PROCESO DE PAVONADO TÉRMICO. Bogotá, Colombia. Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central. Recuperado de:

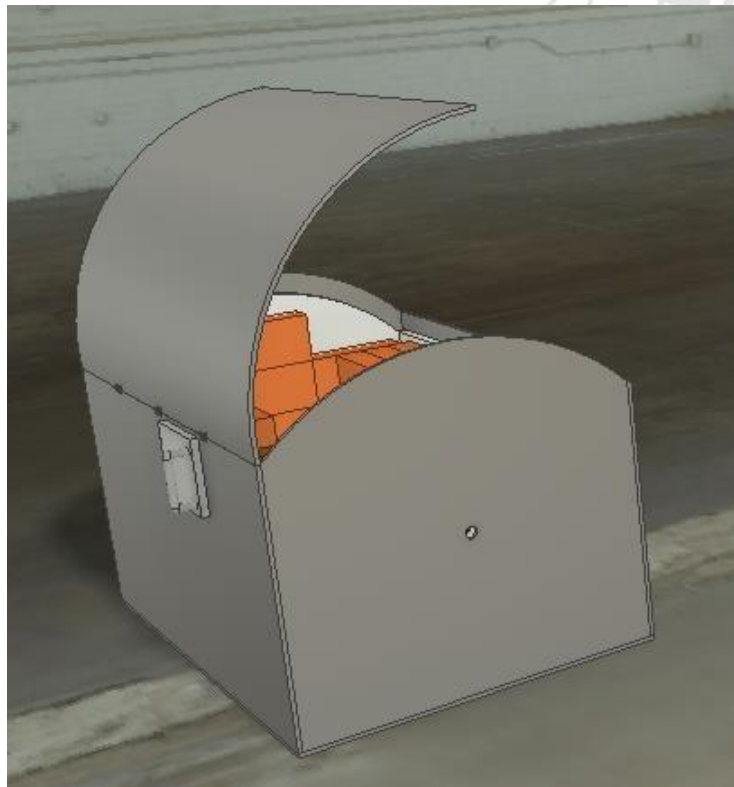
[https://repositorio.itc.edu.co/bitstream/001/301/1/PROYECTO%20INGENIERIA%20ELECTR\\_OMEKANICA.pdf](https://repositorio.itc.edu.co/bitstream/001/301/1/PROYECTO%20INGENIERIA%20ELECTR_OMEKANICA.pdf)

- Domingo, A.(2011). Apuntes de Transferencia de Calor. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de:  
<http://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>

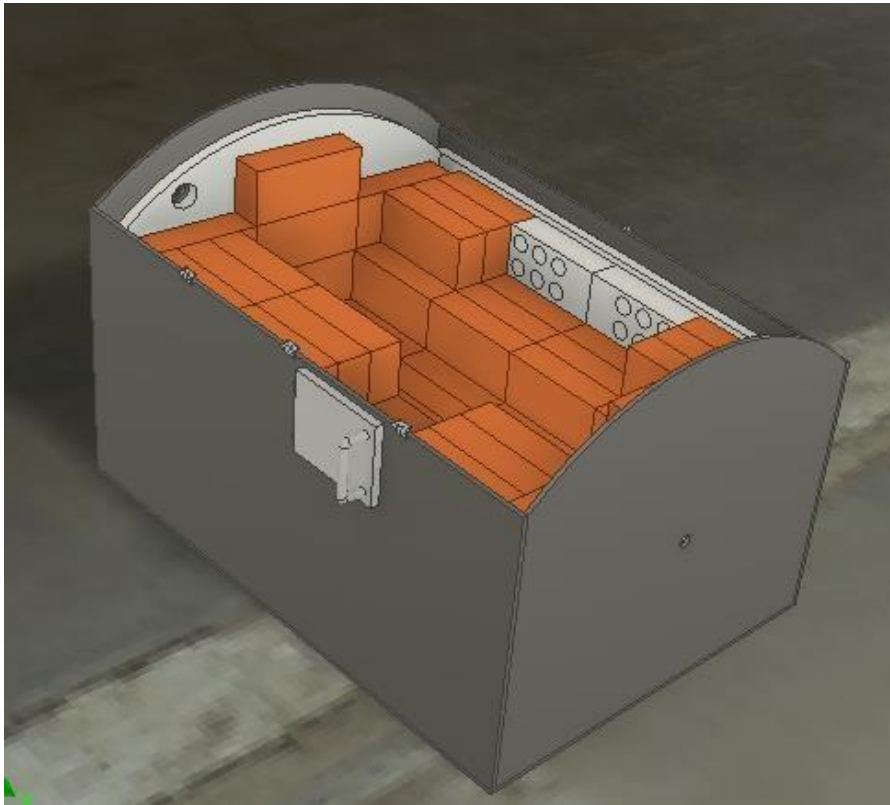
## 9. Anexos



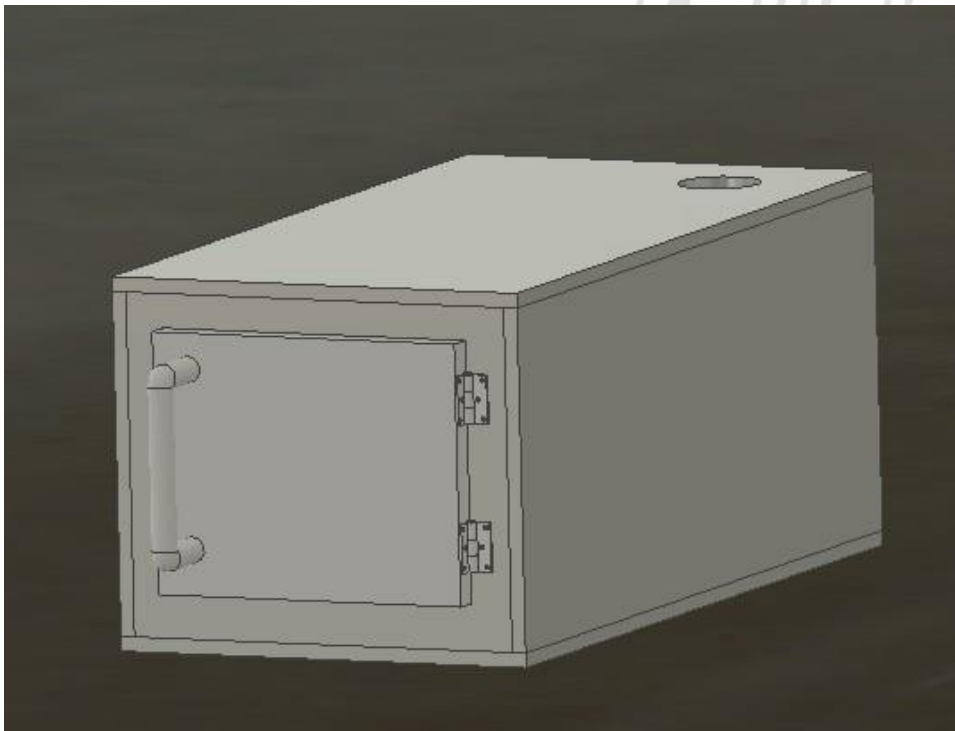
**Anexo 1. Ensamble horno parte superior unida con bisagras.**



**Anexo 2. Ensamble horno.**

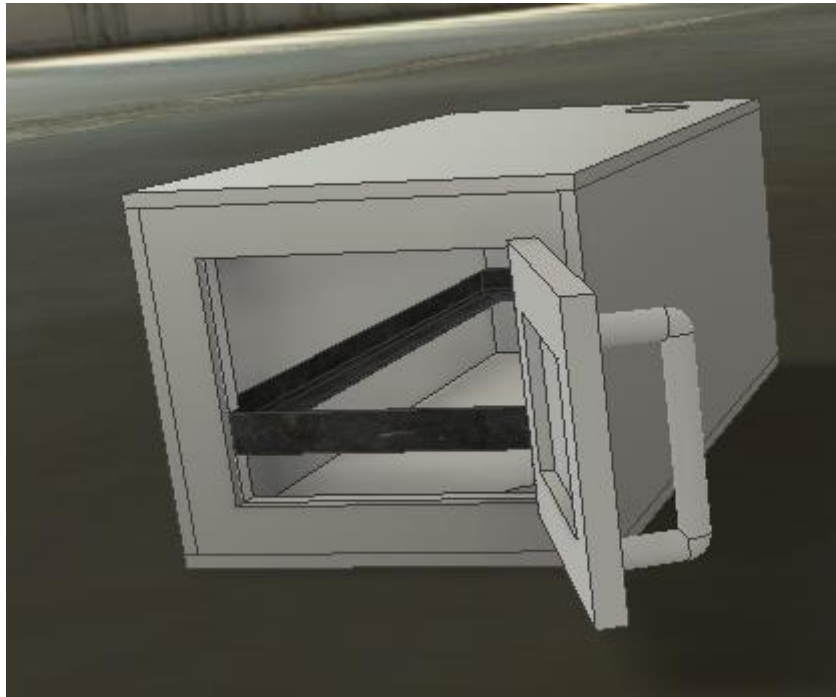


**Anexo 3. Ensamble interior horno.**

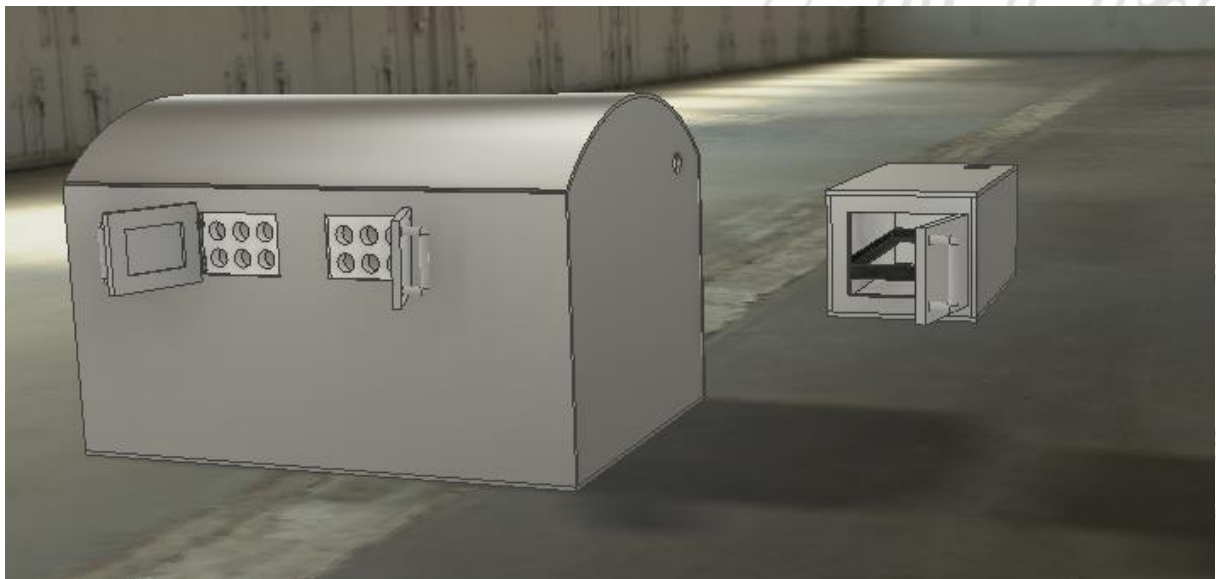


**Anexo 4. Ensamble precalentamiento.**





**Anexo 5. Interior precalentamiento**



**Anexo 6. Sistema completo**