



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Industria
Ingeniería Mecánica

Puesta en Marcha e Instrumentalización de Dos Hornos de
Gas para Tratamiento Térmico de Metales en la Universidad
Nacional de Ingeniería

AUTORES

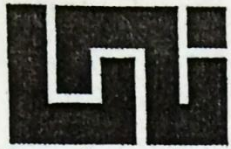
Br. Carlos Fidel Argüello Rodríguez

Br. Iván Antonio Mercado Sánchez

Tutor

Msc. Ing. Jorge Alberto Rodríguez García

Managua, 27 de Julio de 2016.



Líder en Ciencia y Tecnología

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Tecnología de la Industria

DECANATURA

A: Brs. Carlos Fidel Arguello Rodríguez
 Iván Antonio Mercado Sánchez

DE: Facultad de Tecnología de la Industria

FECHA: Lunes 11 de mayo del 2015

Por este medio hago constar que su trabajo de Investigación Titulado **"Puesta en Marcha e Instrumentalización de Dos Hornos de Gas para tratamiento Térmico de Metales en la Universidad Nacional de Ingeniería"** Para obtener el título de Ingeniero Mecánico, y que contara con el Ing. Jorge Alberto Rodríguez García Como profesor guía, ha sido aprobado por esta Decanatura por lo que puede proceder a su realización.

Cordialmente,

Ing. Daniel Cuadra Horne
Decano



C/c Expediente



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Tecnología de la Industria

DECANATURA

A: Brs. Carlos Fidel Argüello Rodríguez
Iván Antonio Mercado Sánchez

DE: Facultad de Tecnología de la Industria

FECHA: Miércoles 13 de enero del 2016

Por este medio hago constar que la solicitud de prórroga para el trabajo de Investigación Titulado **“Puesta en Marcha e Instrumentalización de Dos Hornos de Gas para Tratamiento Térmico de Metales en la Universidad Nacional de Ingeniería”**, para obtener el título de Ingeniero Mecánico, y que contara con el Ing. Jorge Alberto Rodríguez García, Como tutor, ha sido aprobado para el día viernes 13 de mayo del año del 2016.

Cordialmente,

Ing. Daniel Cuadra Horney
Decano



C/c Archivo

13 de Mayo del 2016

Ingeniero

Daniel Augusto Cuadra Horney

Decano de la Facultad de Tecnología de la Industria (FTI)

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)

Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios (RUPAP)

Managua

Estimado Ing. Cuadra,


Por este medio, tengo el gusto de presentar y recomendar el trabajo Monográfico *Puesta en Marcha e Instrumentalización de Dos Hornos de Gas para Tratamiento Térmico de Metales en la Universidad Nacional de Ingeniería* de los bachilleres Carlos Fidel Argüello Rodríguez (5M1-MEC/ #2010-33167) e Iván Antonio Mercado Sánchez (5M1-MEC/ #2010-33621), dos jóvenes serios, estudiosos y capaces de realizar un buen trabajo. Ellos ya culminaron las clases del pensum de Ingeniería Mecánica y el siguiente paso es este.

Para ello, necesitan su apoyo aprobando al proyecto en donde yo les he asistido durante todo el trayecto.

Agradezco de antemano la atención a la presente.

Sin otro particular, le saludo,

Atentamente



Msc. Ing. Jorge A. Rodríguez García
Profesor Titular
Jefe de Control y Restauración de Equipos
jarodriguezg7@yahoo.es
Cel: 8970-9382



Lider en Ciencias y Tecnología

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA
SECRETARÍA DE FACULTAD**

SECRETARÍA DE FACULTAD

F-8: CARTA DE EGRESADO

El Suscrito Secretario de la **FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA** hace constar que:

ARGUELLO RODRIGUEZ CARLOS FIDEL

Carne: **2010-33167** Turno **Diurno** Plan de Estudios **972A** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, es **EGRESADO** de la Carrera de **INGENIERÍA MECANICA**.

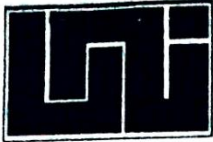
Se extiende la presente **CARTA DE EGRESADO**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los cuatro días del mes de junio del año dos mil dieciséis.

Atentamente,

Inq. Wilmer José Ramírez Velásquez
Secretario de Facultad



Managua, Nicaragua. Apdo. 5595 Tel: 22486879-22490942-22401653



Lider en Ciencia y Tecnología

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA**

SECRETARÍA DE FACULTAD

F-8: CARTA DE EGRESADO

El Suscrito Secretario de la **FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA** hace constar que:

MERCADO SANCHEZ IVAN ANTONIO

Carne: **2010-33621** Turno **Diurno** Plan de Estudios **972A** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, es **EGRESADO** de la Carrera de **INGENIERÍA MECANICA**.

Se extiende la presente **CARTA DE EGRESADO**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte y cuatro días del mes de mayo del año dos mil dieciseis.

Atentamente,

Ing. Wilmer José Ramírez Velásquez
Secretario de Facultad



Managua, Nicaragua. Apdo. 5595 Tel: 22486879-22490942-22401653

Resumen

En el presente trabajo se exponen los pasos realizados para la puesta en marcha y explotación de los hornos de tratamiento térmico que operan con gas lo cual aporta significativas mejoras en el laboratorio de tratamiento térmico y su implicación en las actividades docentes.

El propósito es dejarle a la Universidad Nacional de Ingeniería, instalados los dos hornos de tratamiento térmico que habían sido donados por Gran Bretaña para un posterior uso en trabajos de tratamiento termo-químico.

El objetivo de esta monografía es lograr la instalación de estos junto con sus respectivos equipos de medición de temperatura, conocer el procedimiento que requiere cada uno de los procesos implicados y aplicarlos. Fomentar la instalación de este tipo de máquinas para uso de la industria, que mejoran las propiedades físicas y químicas de los metales, necesario para aplicaciones especializadas.

Índice

I. Introducción.....	1
II. Objetivos.....	3
III. Justificación.....	4
IV. Marco Teórico.....	5
Generalidades de los tipos de Hornos.....	5
Hornos Eléctricos.....	5
Hornos de Combustión.....	6
Construcción de los Hornos.....	8
Sistema de Control de Temperaturas.....	9
V. Desarrollo del Proyecto.....	14
Capítulo I Revisión y Puesta en Marcha.....	14
Introducción.....	14
1.1 Revisión de los elementos.....	15
1.2 Montaje y Conexión del Sistema de Flujo de Gas.....	21
1.3 Conexión del Sistema de Inyección de Aire del Horno de Temple.....	24
1.4 Construcción del Sistema de Evacuación de Gases.....	26
1.5 Indicadores de Funcionamiento de los Hornos.....	29
1.5.1 Combustión por Difusión	29
1.5.2 Combustión con Inyección completa de Aire	31
1.5.3 Prueba del Horno de Revenido.....	31
1.5.4 Encendido del Horno de Temple.....	34
Capítulo II Montaje y Puesta del Sistema de Medición de Temperatura.....	37
Introducción.....	37
2.1 Montaje del Termopar para Horno de Revenido.....	37
2.2 Montaje del Termopar para Horno de Temple.....	38
2.3 Conexiones al Breaker y Medidor de Temperatura.....	39
2.4 Pruebas del Sistema.....	40
2.4.1 Horno de Revenido.....	40
2.4.2 Horno de Temple.....	40
2.4.3 Consumo de Gas.....	42
Capítulo III Pruebas de Temple y Revenido.....	43
Introducción.....	43

3.1 Clasificación de los Tipos de Tratamiento Térmico.....	43
3.1.1 Recocido.....	44
3.1.2 Normalizado.....	44
3.1.3 Temple.....	44
3.1.4 Revenido.....	46
3.1.5 Cementación.....	47
3.2 Aceros Seleccionados.....	48
3.3 Temperaturas seleccionadas para temple y revenido.....	49
3.4 Curvas de durezas alcanzadas.....	50
VI. Conclusiones.....	52
VII. Recomendaciones.....	53

I. Introducción

En el Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios de la Universidad Nacional de Ingeniería, se imparte la carrera de Ingeniería Mecánica donde se instruye a los alumnos en distintos campos del diseño, la manufactura y el mantenimiento de elementos de máquinas industriales.

Hay dos hornos didácticos, propiedad de la universidad, que pueden habilitarse para ser usados en prácticas de tratamiento térmico. Al carecer de múltiples piezas necesarias para su funcionamiento habían estado inactivos desde que fueron donados.

Los dos hornos operarán con gas propano, se instalarán y se pondrán en marcha para funcionar en el Laboratorio de Tratamiento Térmico junto el pirómetro que servirá para el respectivo control de temperatura.

Con el uso de estos, se incrementarán las propiedades físicas de probetas de metal, específicamente de acero al carbono y aleado. La realización de estas pruebas dejará mejoras en el laboratorio, haciéndolo más asequible para la enseñanza de Procesos de Manufactura I a los alumnos a través de demostraciones, de manera que asimilen mejor y pongan en práctica los conocimientos teóricos adquiridos.

Durante la instalación se colocará un termopar tipo K en el interior de la recámara que conectará con el indicador de temperatura a través de un cable de compensación.

Ambos estarán compartiendo un indicador de temperatura digital. Estarán separados el uno del otro a una distancia de dos metros por motivos de seguridad. Esto permitirá controlar las válvulas manualmente para acondicionar el ambiente térmico en el interior de cada recámara.

Los hornos se utilizarán para realizar tratamientos térmicos de revenido y temple a probetas de metales aleados con vista a realizar en el futuro tratamiento termoquímico de Cementación.

Se define como **Problema Científico** a resolver con el proyecto, lograr los tratamientos térmicos de temple y revenido en acero aleado y al carbono con los hornos operados con gas.

Siendo **Objeto de Estudio** en esta investigación, la tecnología de tratamiento térmico en aceros obtenida en hornos de gas y su **Campo de Acción**, la tecnología de tratamiento térmico, se empleará la Metalurgia como ciencia de apoyo a este proceso.

Se define como **Hipótesis**: La puesta en marcha e instrumentalización de los dos hornos es viable porque los instrumentos de medición que utilizan se pueden conseguir en el mercado nacional.

II. Objetivos

Generales

Poner en marcha e instrumentalizar dos hornos de gas de tratamiento térmico de metales en la Universidad Nacional de Ingeniería en el I semestre del año 2016.

Específicos

- Habilitar los hornos para su buen funcionamiento por medio de un diagnóstico y la consecuente ejecución del mantenimiento conductivo y modificativo a los hornos Z5687 y Z129.
- Asegurar el correcto suministro del combustible a los hornos por medio del diseño de un sistema de tuberías entre los hornos y el tanque de gas propano, realizando además las respectivas pruebas de fugas.
- Instrumentar con un lector de temperatura a los hornos de tratamiento térmico, que cumpla con un rango de operación que abarque ambos hornos y sea de fácil manipulación.
- Calibrar los hornos mediante un diseño experimento con el cual se estará valorando el funcionamiento y los parámetros de trabajo de cada uno.
- Comprobar (la eficacia del procesamiento de metales en) la correcta operatividad de los hornos y el control de temperatura, por medio del registro de las durezas brinell en el taller de metales de tres probetas de acero al carbono y tres de acero aleado, que serán tratadas térmicamente en los hornos y evaluados sus cambios de dureza.

III. Justificación

Se ha elegido este tema porque aún después de muchos años, no se habían instalado estos hornos habiéndose considerado incluso desecharlos aunque no presentaban defectos de ningún tipo.

La falta de equipos para pruebas y prácticas en la universidad lo amerita/n con presteza, la aplicación de los hornos en pruebas de laboratorio será ideal para demostraciones durante las clases de Procesos de Manufactura I en la formación de los futuros ingenieros, de esta forma, se ampliarían las posibilidades del Laboratorio de Tratamiento Térmico.

El trabajo se realizó para que la universidad pueda sacarle provecho a estos los hornos de tratamiento térmico a gas, utilizándolos en las actividades curriculares específicamente para la asignatura de Procesos de Manufactura I. Además, sabiendo que la innovación y la tecnología son parte de los principios de la universidad, la ejecución de este trabajo vendrá a darle una mayor capacidad y aptitud a la institución (en el campo del tratamiento térmico).

IV. Marco Teórico

1. Generalidades de los Tipos de Hornos

Para comenzar, un horno puede definirse como un espacio encerrado en el que se produce calor mediante la oxidación química de un combustible. Los Hornos de Tratamiento Térmico son equipos destinados a procesos en los que la temperatura a utilizar es muy elevada; utilizan grandes cantidades de energía; por ello es necesario, para optimizar el proceso, contar con buenos aislamientos, controles más efectivos de la combustión y recuperación del calor que se libera.

Hay diversos tipos de hornos para realizar tratamientos térmicos, mismos que se diferencian entre sí ya que dependen básicamente del tratamiento térmico específico a realizarse.

En la industria el tipo de horno de combustión se emplea mucho más que el de horno eléctrico, sin embargo, para muchas aplicaciones se prefiere el horno eléctrico, ya que ofrece ventajas que no pueden ser medidas por el costo del combustible.

1.1 Hornos Eléctricos¹

En la actualidad, este tipo de hornos son de uso muy extendido y con los sistemas de programación que se incorporan son muy útiles y fiables por su comodidad y fácil manejo.

La electricidad es un agente calefactor que permite el control más preciso en los hornos de tratamiento térmico, además de ello, los Hornos Eléctricos presentan otras ventajas citadas a continuación:

- Pueden obtenerse temperaturas muy elevadas hasta de 3500 °C.
- Puede controlarse la velocidad de elevación de temperatura, y mantener esta entre límites muy precisos, con regulaciones completamente automáticas.
- La carga queda por completo libre de contaminación del gas combustible.
- Tienen mayor duración los revestimientos que en los demás tipos de hornos.
- Se instalan en espacio reducido.
- Su operación se realiza con mayor higiene que la de los otros tipos de hornos.

Estos hornos están provistos de un sistema de calefacción incorporado a la cámara de calentamiento (donde se colocan las piezas que van a tratarse), alrededor de la cual se hallan instaladas varias resistencias eléctricas que suministran el calor necesario para realizar los tratamientos térmicos. Son muy usados en los talleres, debido a la facilidad de su manejo, la uniformidad de calentamiento, la precisión de las temperaturas que se desean alcanzar y el mantenimiento constante de las mismas.

1.2 Hornos de Combustión²

Uno de los requisitos de un horno de combustión es que se debe completar el encendido del quemador para obtener la reacción de combustión que se desea. Es esencial que se tomen en consideración al horno y al quemador en combinación para proporcionar los cuatro elementos de una buena combustión:

- Íntima mezcla del combustible y el oxidante (aire).
- Admisión de cantidades suficientes de oxidantes para quemar por completo el combustible.
- Una temperatura suficiente para encender la mezcla aire-combustible y completar su combustión.
- El tiempo necesario de residencia para que la combustión sea completa.

Aire necesario para la combustión. Cuando se conoce la composición química de un combustible es posible calcular la cantidad de oxígeno necesario para una combustión completa. Sin embargo, la combustión no se hace con oxígeno puro, sino con aire, compuesto casi exclusivamente de nitrógeno y oxígeno (79% vol. de nitrógeno y 21 % vol. de oxígeno). El utilizar aire como medio carburante, trae como consecuencia la introducción de una gran masa de nitrógeno (que no participa en las reacciones químicas de la combustión) que absorbe buena parte del calor generado, seguido de un descenso de la temperatura de la llama y aumento de las pérdidas de calor, arrastrado por los humos en la chimenea.

Combustibles Gaseosos. El gas natural es muy apreciado como combustible por su sencillez de manejo, facilidad de adaptación a procesos automáticos, posibilidad de alcanzar alta eficiencia térmica, limpieza, ausencia total de cenizas y de azufre, entre otras. Todas estas cualidades de gran valor han hecho que en la práctica el gas se utilice ampliamente en la industria.

Actualmente, se dispone para el uso los siguientes gases combustibles :

Tipo de Gas	PCS		PCI		Peso Específico Kg/m ³	Densidad	
	Kcal/m3	Kca/kg	Kcal/m3	Kcal/kg		Gas relativa aire	Líqu. relac. H2O
Natural	9300	12500	8300	11300	0,76	0,62	
Refinería	9500/11000				0,98	0,80	
Propano	22500	12600	21400	11100	1,91	1,56	0,5
Butano	27500	10700	25000	97700	2,56	2,09	0,58

Figura 1. Tipos de combustibles gaseosos y sus características²

El propano y el butano, que son llamados también gases licuados, cubren fundamentalmente, por ahora, el campo del consumo doméstico, teniendo en la industria un uso bastante reducido.

Existen pérdidas de calor que se pueden dividir en tres grandes grupos:

Pérdidas por radiación: se producen desde las paredes calientes del horno hacia la atmósfera, en la actualidad tanto los hornos de gas como eléctricos poseen un aislamiento térmico exterior lo que reduce significativamente estas pérdidas.

Pérdidas a la atmósfera por formación de agua: la formación de agua consume energía. El agua se forma por la presencia de hidrógeno de los combustibles y el oxígeno del aire. Esta pérdida no puede ser evitada porque depende de la composición del combustible utilizado.

Calor arrastrado con los gases de combustión: depende de la temperatura y cantidad de los gases. Los gases de combustión elevan la temperatura ambiente del aire hasta la temperatura de la chimenea. Esta elevación de temperatura consume energía y baja la eficiencia del equipo. Para disminuir este efecto se instalan los serpentines de convección, en los cuales se precalienta la carga del horno u otra corriente (vapor). En otros equipos se utilizan sistemas de precalentamiento de aire, donde los gases de chimenea calientes precalientan el aire de combustión. Este sistema posibilita que los gases de chimenea se envíen al ambiente lo más fríos posibles. De este aspecto es absolutamente responsable el operador y del buen manejo que haga del equipo, dependerá finalmente la eficiencia de la combustión.

2. Construcción de los hornos³

En los hornos de cámara las piezas se colocan directamente dentro de esta. Generalmente, la cámara o mufla es rectangular o abovedada y está construida con material refractario altamente resistente al fuego, estos materiales pueden ser de grafito, carburo de silicio, y otros tipos de cerámico, los cuales se conocen como cerámicos de alta calidad.

Se emplean principalmente para realizar las operaciones de recocido, normalizado, temple y revenido. Siendo necesario proteger las piezas contra la descarbonización, usando cajas especiales.

Los hornos están constituidos por los siguientes elementos:

- Carcasa.
- Fuente de calor (llama o resistencia eléctrica).
- Cámara de calentamiento.
- Controladores de temperatura.

En la siguiente figura se muestran estos elementos de constitución de los hornos.

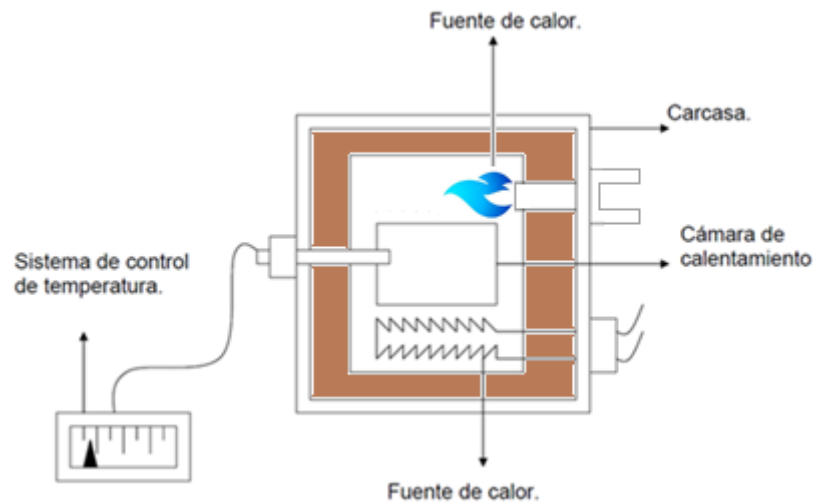


Figura 2. Partes Constructivas de los Hornos³.

Carcasa. Es la parte exterior del horno que está construida en chapa de acero, interiormente lleva un revestimiento del material refractario que sirve para evitar pérdidas de calor en el medio ambiente.

Fuente de calor. La fuente de calor en los hornos eléctricos está constituida por una resistencia alimentada por energía eléctrica, mientras que en los hornos a gas la fuente de calor es la llama producida por la combustión.

Las resistencias se construyen en alambre, o cinta con una aleación de Nicromo (Níquel 80%, Cromo 20%), resistente a altas temperaturas (1200 °C), o de varillas refractarias a base de carburo de silicio (que alcanza temperaturas de hasta 1300 °C) y se hallan ubicadas en el interior de la carcasa, cubriendo la superficie interna de la cámara. Para lograr temperaturas superiores se utilizan resistencias de Molibdeno (1800 °C), de Tungsteno (2500 °C), y de Grafito (2700 °C). Estos hornos eléctricos de Tratamiento Térmico aprovechan el calor generado según la ley de Joule.

Existen algunos hornos de combustión en los cuales la combustión no se da en el interior del horno, sino en el exterior en una parte llamada quemador que es un dispositivo donde se entra la mezcla a velocidades y turbulencias adecuadas para una combustión controlada, así luego se transmite el calor al horno. Los quemadores para combustibles gaseosos queman y se regulan con mayor facilidad ya que la combustión se realiza en una sola fase y no existen problemas de atomización, vaporización.

Cámara de Calentamiento. Es el lugar donde se colocan las piezas que van a tratarse térmicamente, a la cámara suele denominársele mufla y se fabrica de material refractario; las resistencias eléctricas están instaladas en las paredes laterales.

Las muflas, generalmente, tienen forma rectangular y frecuentemente, tienen el techo abovedado, sus dimensiones son variables, según la capacidad del horno y la finalidad para la que fue construida.

3. Sistema de Control de Temperaturas⁴

Para el control de temperatura de la cámara de calentamiento, se utiliza un pirómetro. El termopar de éste, se sitúa dentro de la mufla o crisol. En los hornos de cámara es fijo y se halla ubicado en la parte posterior o superior de la mufla, en un alojamiento especial; cuando el horno es de gran longitud, puede tener más de un termopar.

Los pirómetros termoeléctricos son aparatos que se usan para medir y controlar las temperaturas generalmente comprendidas entre 100 °C y 1200 °C. Se utilizan en todo tipo de hornos así como en los hornos para tratamientos térmicos, en calderas y otros dispositivos intercambiadores de calor industrial.

Constitución de los Sistemas de Control de Temperatura. Los sistemas de control de temperaturas se componen de los siguientes elementos:

- El termopar.
- El tubo de protección o termocupla.
- Hilos de compensación.
- Aparato indicador o pirómetro.

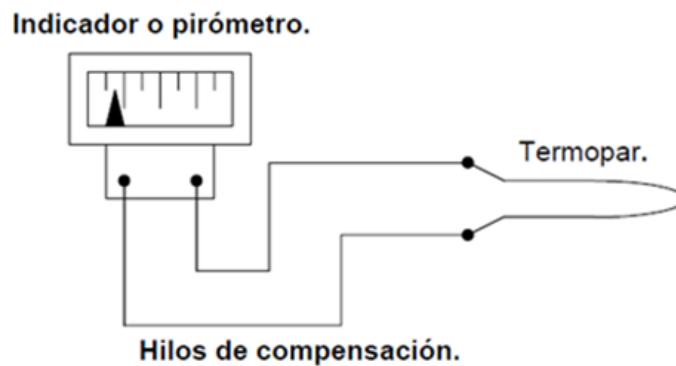


Figura 3. Elementos de un Sistema de Control de Temperatura.

El Termopar. Este elemento, está compuesto por dos alambres metálicos de composición química diferente, soldados en uno de sus extremos y unidos en el otro extremo, a los hilos de compensación. Cuando los extremos soldados del termopar se calientan al ponerse en contacto con una fuente de calor, se crea una corriente eléctrica entre los dos alambre soldados. Esta corriente eléctrica se transmite por medio del hilo de compensación hasta el aparato indicador, donde se acciona el display digital o la aguja móvil la cual se desplaza sobre una escala de temperaturas.

El desplazamiento de la aguja sobre la escala de temperaturas es mayor, cuando mayor es la temperatura de la fuente calorífica medida, la corriente eléctrica generada, es directamente proporcional a la temperatura del termopar.

Al escoger los materiales que forman el termopar, se toman en cuenta algunos factores que garantizan su mantenimiento y comercialización. De esta forma, actualmente existen los siguientes tipos:

Cobre - Constantano (Tipo "T"). Están formados por un alambre de cobre como conductor positivo y una aleación de 60% de cobre y 40% de níquel como elemento conductor negativo. Tiene un costo relativamente bajo, se utiliza para medir temperaturas bajo o 0 °C. Y como límite superior se puede considerar los 350° C, ya que el cobre se oxida violentamente a partir de los 400° C.

Hierro - Constantano (Tipo "J"). En este tipo de junta el hierro es electropositivo y el constantano electronegativo. Mide temperaturas superiores que el anterior ya que el hierro empieza a oxidarse a partir de los 700° C. No se recomienda su uso en atmósfera donde exista oxígeno libre. Tiene un costo muy bajo y esto permite que su utilización sea generalizada.

Chromel - Alumel (Tipo "K"). Una aleación de 90% de níquel y 10% de cromo es el conductor positivo y un conductor compuesto de 94% de níquel, 2% de Aluminio, 3% de manganeso y 1% de Silicio como elemento negativo. Este

termopar puede medir temperaturas de hasta 1200° C. Ya que el níquel lo hace resistente a la oxidación. Se los utiliza con mucha frecuencia en los hornos de tratamientos térmicos. Su costo es considerable lo que limita su utilización.

Platino Rodio - Platino (tipo "R"). Tienen como conductor negativo un alambre de platino y como conductor positivo una aleación de 87% de platino con 13% de sodio. Este tipo de junta desarrollada últimamente con materiales de alta pureza son capaces de medir hasta 1500° C si se utilizan las precauciones debidas. Son muy resistentes a la oxidación pero no se aconseja su aplicación en atmósferas reductoras por su fácil contaminación con el hidrógeno y nitrógeno que modifican la respuesta del instrumento.

Platino Rodio - Platino (Tipo "S"). El conductor positivo es una aleación de 90% de platino y 10% de Rodio mientras que conductor negativo es un alambre de platino. Sus características son casi similares al termopar anterior con la diferencia que no puede usarse a temperaturas elevadas porque los metales no son de alta pureza produciendo alteraciones de la lectura a partir de los 1000° C. en adelante.

Molibdeno - Renio. Fue desarrollado recientemente y se utiliza para temperaturas inferiores a los 1650° C. Se recomienda usarlos en atmósfera inerte, reductora o vacía ya que el oxígeno destruye al termopar.

Tungsteno - Renio. Al igual que el anterior fue recientemente creado y no tiene datos normalizados de temperatura y mili voltajes. Puede medir temperaturas de hasta 2000° C, el oxígeno y los cambios bruscos de temperaturas destruyen al termopar. Funcionan perfectamente en atmósferas reductoras e inertes si se los protege con funda cerámicas.

Iridio - Iridio Rodio. Puede medir como máximo 2.000 °C. Su uso es recomendable en atmósferas oxidantes que contienen oxígeno libre. El Hidrógeno produce alteraciones permanentes en el termopar, reduciendo además su vida útil.

Tungsteno - Tungsteno Renio. Tiene igual utilización que el tungsteno renio con la única diferencia que genera mayor mili voltaje por grado. En la siguiente gráfica se muestra el mili voltaje generado por los termopares a diversas temperaturas de su junta caliente y con su junta fría a una temperatura de referencia de 32° F o 0 °C. Los tipos de termopares los podemos identificar con un código de colores, el cual varía dependiendo del país del fabricante.



Tipo termopar	Metales	Rango temperatura
B 	+ Platino – 30% Rodio - Platino – 6% Rodio	0 + 1700 °C
C 	+ Tungsteno – 5% Renio - Tungsteno – 26% Renio	0 + 2320 °C
E 	+ Níquel – Cromo - Cobre – Níquel	-200 + 900 °C
J 	+ Hierro - Cobre - Níquel	0 + 750 °C
K 	+ Níquel – Cromo - Níquel - Aluminio	-200 + 1250 °C
N 	+ Níquel – 14,2% Cromo – 1,4% Silicio - Níquel – 4,4% Silicio – 0,1% Magnesio	-200 + 1250 °C
R 	+ Platino – 13% Rodio - Platino	0 + 1450 °C
S 	+ Platino – 10% Rodio - Platino	0 + 1450 °C
T 	+ Cobre - Cobre - Níquel	-200 + 350 °C

Figura 4. Rangos de temperatura de los distintos tipos de termopar

Tubo de Protección o Termocupla. Usualmente, se protege al termopar contra roturas y ataques de gases u otras materias destructivas, colocándolos dentro de un tubo de protección (figura 3) llamado tubo de protección o termocupla, el cual está construido con materiales metálicos o refractarios.

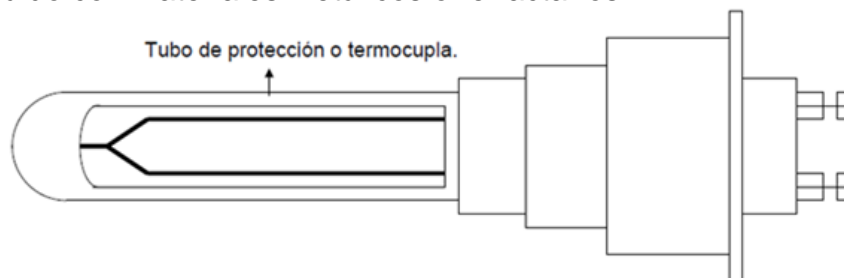


Figura 5. Tubo de Protección o Termocupla.

Hilos de Compensación. Son los alambres que sirven para conectar el termopar con el aparato indicador o pirómetro, estos están hechos de materiales especiales que evitan errores y variaciones en la medición de temperatura.

Aparato Indicador o Pirómetro. Esencialmente, están constituidos por un instrumento eléctrico de medición que sirve para registrar la temperatura. Las lecturas se hacen observando una aguja indicadora móvil o un display digital.

Los tipos de pirómetros analógicos que podemos encontrar son:

- Pirómetro termoeléctrico simple.
- Pirómetro termoeléctrico automático.

La diferencia entre estos tipos de pirómetros es el aparato medidor, esto se puede observar con más claridad en las figuras 6 y 7.

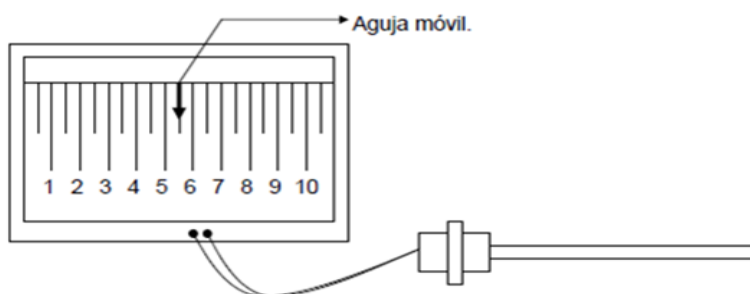


Figura 6. Pirómetro Termoeléctrico Simple.

Nota: Tiene un indicador que únicamente registra las temperaturas.

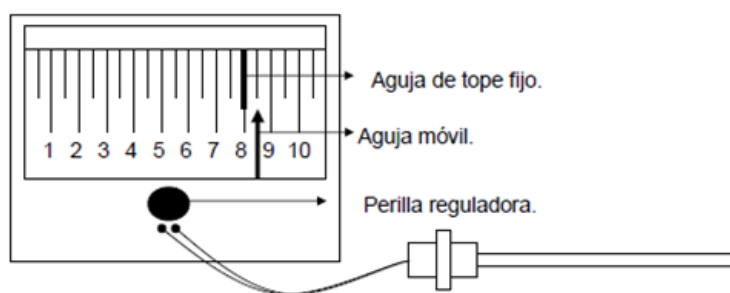


Figura 7. Pirómetro Termoeléctrico Automático.

Condiciones de Uso. Los pirómetros se deben montar en un lugar que no pueda ser afectado ni por vibraciones, ni por el calor del horno o de piezas calientes. Además se debe comprobar que los terminales de los hilos de compensación, estén firmemente conectados a los bornes del indicador de temperatura.

Observación: Existen pirómetros termoeléctricos automáticos con registrador gráfico. Los más utilizados en los talleres de tratamientos térmicos son los automáticos, debido a que con los mismos se obtienen un control y regulación permanente de la temperatura.

Capítulo I **Revisión y Puesta en Marcha**

Introducción

Los hornos que se abarcarán en este proyecto, fueron recibidos como una donación (según las placas oscuras presentes en cada horno) a la universidad hace al menos 40 años. No habiendo quién conozca del funcionamiento, instrumentación o incluso de las modificaciones que pudieron haber recibido, ya que no existe manual o bitácora de ninguno de los hornos. Siendo así que las pruebas que se llevarán a cabo en los hornos, serán las primeras de las que se tendrá constancia y con ellas se obtendrá el conocimiento de cómo funcionan estos equipos y del beneficio que brindarán a la UNI RUPAP al estar activos.



Figura 8. Izquierda, Horno de temple (Azul). Derecha, Horno de revenido (Gris).

Tabla 1 Datos de chapa de los hornos

Temple		Revenido	
Modelo	Z129	Modelo	5687
Volt	200		
Phase	3		
Cycle	60		
LPG Pressure	14 WG	LPG Pressure	8-10 PSI

Sólo ha permanecido la estructura de los hornos con parte del sistema de alimentación de gas sin chimeneas de escape, a excepción del horno de revenido que cuenta con un tramo que tiene una válvula de mariposa (o moneda) para regular la salida de los gases de combustión (fig. 9), aparte de eso, no se tienen instrumentos de medición de temperatura de los hornos.



Figura 9. Válvula de Mariposa en la salida del Horno de revenido.

1.1 Revisión de los Elementos

Se dispuso a hacer la respectiva revisión de los elementos de los hornos para determinar el estado en el que estaban y así tomar decisiones adecuadas. Así que se procedió a desarmar toda la tubería y quitar el teflón viejo.



Figura 10. Hornos sin tubería de suministro de gas

Algunos tramos de tubería y accesorios tenían óxido en su interior debido a que no se almacenaron de manera apropiada, por lo que se procedió -utilizando guantes para químicos- a hacer una limpieza con cepillo y soda cáustica, luego, se enjuagó con agua y se dejó secar al Sol para eliminar cualquier condensado a la hora de reinstalar las tuberías porque podría afectar el proceso de combustión. Se dejaron las piezas en orden para poderlas armar correctamente después.



Figura 11. Desarme y limpieza del sistema de suministro de gas.

Al inspeccionar el horno de temple, se encontró que estaba cubierto de polvo y con mucha suciedad en la cámara de combustión, ya que estaba expuesto al ambiente del Laboratorio de Fundición, los componentes encontrados de su sistema de tuberías se ven en la figura 12.

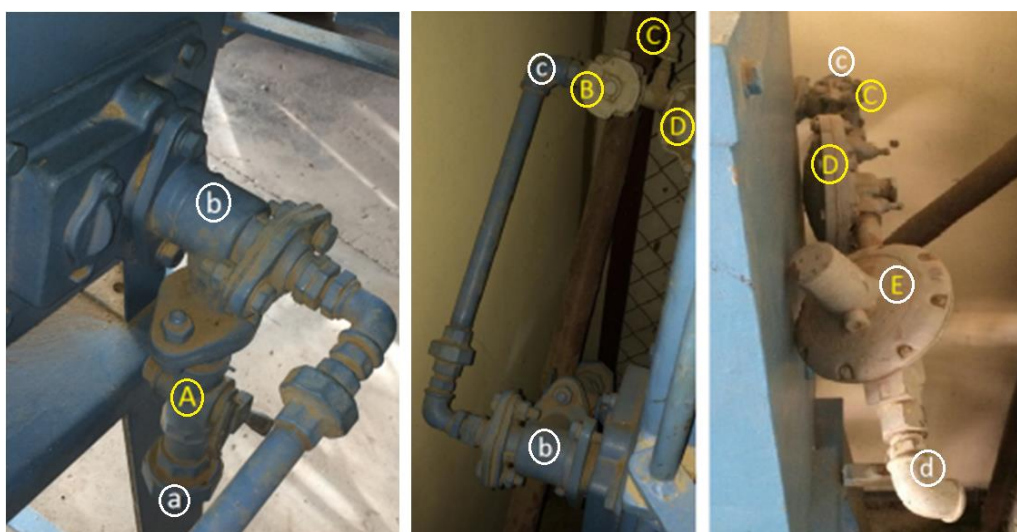


Figura 12. La notación a, b, c y d segmentos de tubería; A - Válvula de Bola, B y C -Válvulas de mariposa, D - Válvula de Retención (Check), E - Válvula de Diafragma.

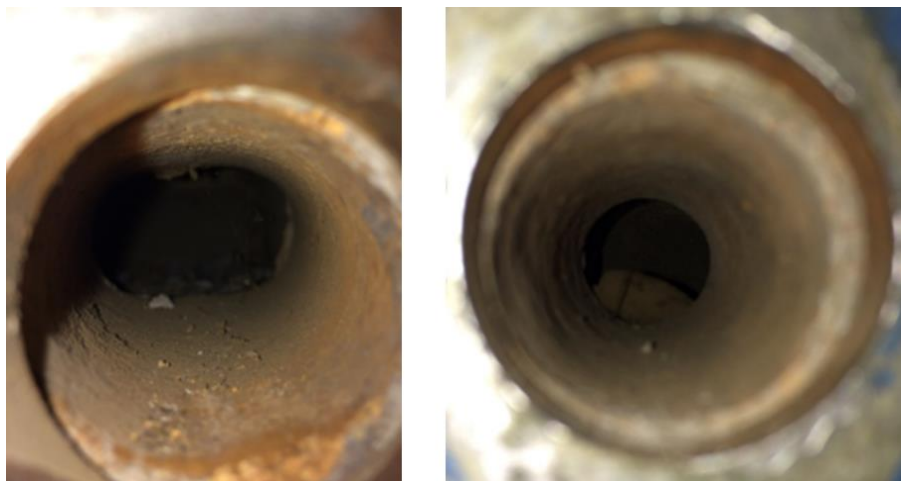


Figura 13. Interior de la recámara de combustión del Horno de Temple.

Las válvulas de diafragma y check se abrieron para comprobar su estado, hallándose ambas en buen estado; sólo se requirió reponer el empaque de la válvula check con Velomoy, ya que se dañó debido a su antigüedad, (fig. 14) y limpiar los componentes de la válvula de diafragma porque había condensación en su interior y residuos de hollín (fig. 15) posiblemente la válvula era usada ya que en el interior de la recámara del horno no había ese mismo rastro de hollín.



Figura 14 Izquierda, Válvula de Diafragma; derecha, Válvula Check con el sello desecho.



Figura 15. Izquierda, Válvula de Diafragma previa a la limpieza; derecha, válvula ya limpia.

El segmento de tubería *a-b* se encontraba obstruido con tapones de tierra debido a insectos que entraron en la tubería al estar abierta al ambiente, lo mismo sucedió con algunas válvulas en el resto del sistema.



Figura 16. Tubería y válvula de paso obstruidas.

Todo lo que es de ladrillo y cemento refractario se halló en buen estado.



Figura 17 Izquierda, puertas de las recamaras; derecha, recámara superior e inferior, respectivamente.

Al inspeccionar el horno de revenido, se realizó la limpieza de la flauta (quemador) y de la parte superior del horno en la cual está la válvula de mariposa (moneda) para la regulación de los gases calientes de salida, utilizando una aspiradora y un compresor. La válvula de mariposa no tenía ningún defecto a corregir.

El horno dispone de un mechero bunsen unido a una manguera flexible para ser usado como medio de ignición de la mezcla; teniendo su regulador de entrada de aire en la parte inferior (fig. 18, derecha).

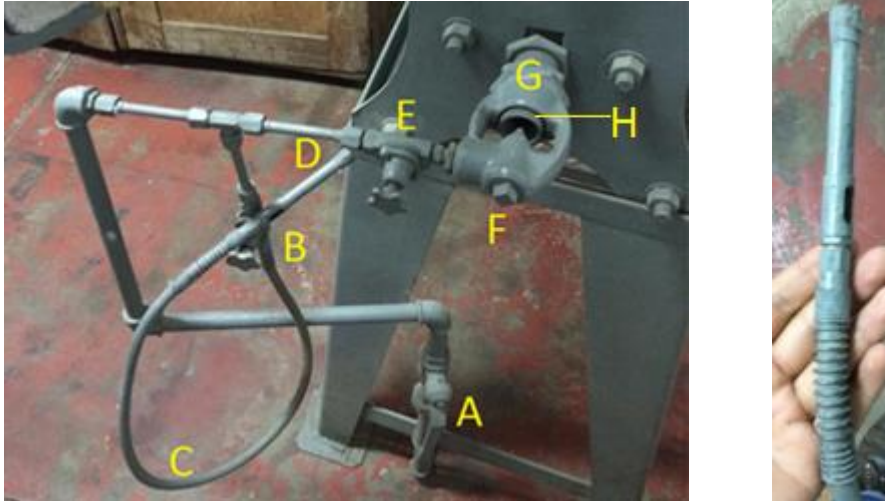


Figura 18. A-Válvula de Bola B-Válvula de mariposa dosificadora del mechero C- Manguera D- Mechero E-Válvula de mariposa dosificadora del inyector F-Inyector G-Entrada del quemador, tipo flauta H-Camisa reguladora de la mezcla aire-combustible.

Se desmontó: La manguera (C) para ser limpiada con un alambre suave por dentro ya que tenía polvo en su interior; la boquilla que dosifica el gas (F) y la boquilla del mechero del horno (D) para poder ser limpiadas con el calibrador de chiclés.

Se realizó la revisión de la válvula de bola (A) y de las dos válvulas de mariposa correspondientes al mechero (B) y de la entrada del gas (E). El elemento refractario de igual manera se halló en buen estado y sin fracturas.



Figura 19. Izquierda, Compuerta del Horno de revenido. Derecha, su recámara. El agujero del fondo es para introducir el termopar.

1.2 Montaje y Conexión del Sistema de Flujo de Gas

Se crearon las condiciones en el Laboratorio de Metales, en el área de Tratamiento Térmico, y se colocaron los hornos en sus respectivos lugares. Previendo cómo se realizaría la instalación de los demás elementos, los dejamos con 1 m de distancia entre ellos.



Figura 20. Hornos de gas ya en sus respectivas posiciones.

Una vez realizado el arreglo del lugar, y la limpieza y revisión de los elementos presentes en los hornos, se dispuso a realizar el sistema de flujo de gas, por lo que se utilizaron tuberías y accesorios de hierro galvanizado sobrantes de la fragua, de las cuales se dispuso 1 válvula de bola de 1 pulgada de diámetro, y tuberías de diversos diámetros.

Para el suministro de gas, se dispondrá de un único cilindro de 100 Lb de gas propano, por lo que se optó por hacer un único sistema de alimentación de gas con bypass híbrido, cobre-hierro galvanizado, para ambos hornos. Partiendo de las tuberías ya disponibles, se armó el sistema completándolo con tubería, accesorios de cobre y una manguera flexible con punta *pool* para alta presión.

Esta manguera fue necesaria debido a que se colocó el cilindro fuera del laboratorio por medidas de seguridad, cosa que a su vez, implicó la perforación de un agujero hacia el exterior y la construcción de una base de concreto para colocar el cilindro de propano.



Figura 21 Construcción de base de concreto para tanque de gas propano.

Considerando que actualmente, las válvulas de diafragma industriales para la regulación de gas son de menor tamaño que las que se usaban anteriormente y previendo el arreglo unificado que tendrá la tubería, se eliminó la válvula de diafragma que ya traía la tubería del horno de temple (fig. 12, E), ya que se necesita una válvula por horno; siendo la opción más sencilla eliminar dicha válvula y conseguir una que vaya a la salida del tanque y sirva para ambos hornos. Se conservó en esta modificación, a la válvula check del horno de temple porque su sistema de alimentación fue diseñado en dos etapas para contrarrestar la presión extra generada por el aire saliendo del turbo.

Fue necesario poner 2 válvulas de bola (1 galvanizada y 1 de cobre) para limitar el flujo de gas al horno que estará en funcionamiento en ese momento.



Figura 22 Bypass en la tubería de gas.

Se consideró más fácil el encendido del horno de revenido debido a que su diseño permite el encendido con un fósforo de forma fácil directamente sobre la flauta (quemador), por lo que se optó por trasladar el mechero a la tubería del horno de temple.



Figura 23 Mechero en el sistema de tuberías del horno de temple.

Todas las conexiones se sellaron con teflón grado industrial y finalmente se verificó el buen estado de las conexiones en las tuberías por medio de las pruebas de fugas con flujo de gas y agua jabonosa, evitando así cualquier riesgo de incendio dentro del laboratorio. Esta operación debe repetirse antes de realizar el encendido de los hornos.

1.3 Conexión del Sistema de Inyección de aire del Horno de Temple

El horno de temple está destinado para tratamiento térmico de temple de aceros, por ende, la temperatura a alcanzar debe ser alta (con un máximo de 1,000 °C que es límite de lectura del indicador de temperatura) sabiendo que para obtener una mayor potencia se requiere un mayor consumo de aire-combustible y para poder lograr esto, se necesita añadir más aire con el fin de que la mezcla mantenga la proporción adecuada eliminando la generación de hollín e inquemados.

La conexión de gas que ya poseía el horno de temple, indica que había una inyección de aire en el sistema formándose una pre mezcla gracias a un turbo, por lo que se indagó la disponibilidad de turbos en el mercado nacional, encontrándose entre los de menor baja capacidad, uno de las siguientes características:

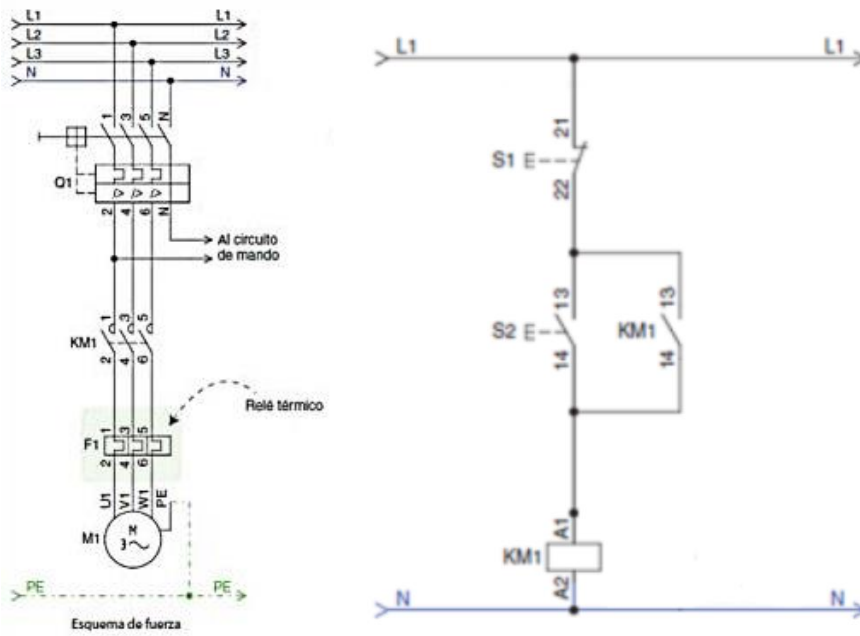
Tabla 2 Datos de chapa del turbo.

Modelo N°	CY125	Ciclos	60/50 Hz
Fases	3	R.P.M.	3200/2800
Potencia	200 W	Flujo de aire	11.6/935 (m ³ /min)
Voltaje	220-380	Presión	66.5/ 46 mmAq
Amp	0.8/0.4		

Se realizó la conexión del turbo al sistema de tuberías, para ello, se requirió de un tubo al cual se le cortó a la medida necesaria, se le hizo la rosca pertinente y se soldó a una placa de 3/8" (fig.24, izquierda). Luego, se montó el turbo sobre una base de madera que amortiguará las vibraciones cuando esté encendido.



Figura 24. Izquierda, Turbo ya instalado. Centro, breaker trifásico (arriba) y sistema de arranque y paro (abajo). Derecha vista frontal y lateral de la caja ya cerrada



Esquema 1. Conexión eléctrica del turbo y su circuito de mando.

Para hacer la instalación eléctrica del turbo, fue necesario poner una línea trifásica de 23 m al panel ubicado en UNEN MECÁNICA -esto debido a que el Laboratorio de Metales no disponía de una conexión trifásica-, así como la construcción de una caja para el sistema arranque y paro del turbo, y la instalación de un breaker (de 3x6 A) en el Laboratorio de Tratamiento Térmico por medidas de seguridad y evitar depender de UNEN para cada vez que se requirieran hacer pruebas (fig. 24, derecha). Luego se hizo una prueba de encendido para determinar las líneas correspondientes para encontrar el sentido de giro correcto de la turbina.

1.4 Construcción del Sistema de Evacuación de Gases

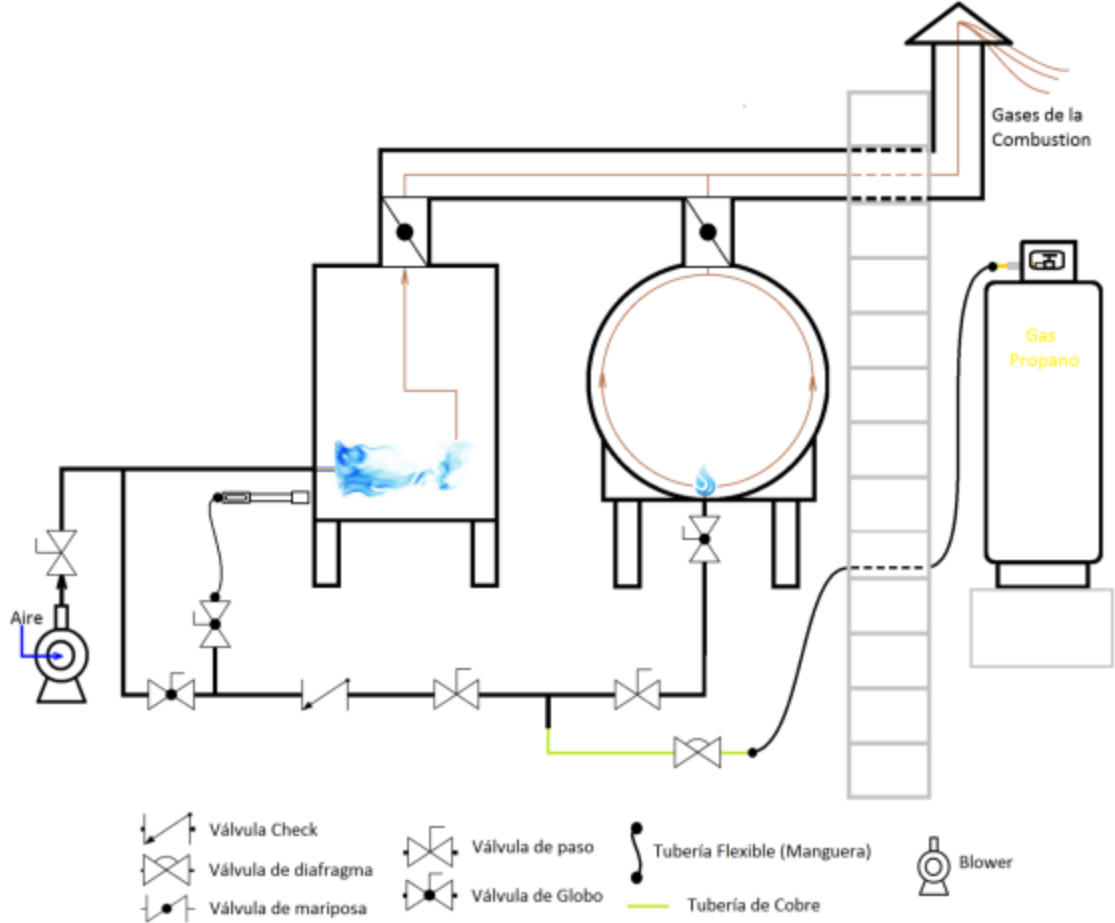
El laboratorio de Tratamiento Térmico de Metales es una habitación cerrada debido a que los únicos hornos activos son los eléctricos. La introducción de los dos hornos de gas supone una continua emisión de gases de combustión cuando están en funcionamiento. Por la seguridad del operador y para evitar el aumento excesivo de la temperatura del lugar, se deben expulsar al ambiente por medio de un sistema de tuberías para evacuar estos gases.

Para esto, se partió de un tramo de tubería de hierro de unos 13 cm de diámetro y una placa de 3/8 de pulgada que vinieron a ser el segmento de tubería *a-b* del horno de temple (fig. 25). Para regular los gases de salida, se le construyó una válvula de mariposa (punto *a*), quedando la manija para la regulación de gases en la parte posterior de la tubería. Para el segmento *c-d*, se dejó el segmento de tubería que ya traía el horno de revenido. La demás construcción de la chimenea se hizo con láminas galvanizadas utilizando técnicas de hojalatería y sellándolas con un cemento plástico resistente a altas temperaturas. Para que llegara al exterior, se realizó la perforación de la pared justo por debajo de la viga para evitar que se debilitara la estructura del edificio.



Figura 25. Tubería de evacuación de gases.

El sistema se puede esquematizar de la siguiente manera:



Esquema 2. Esquema de flujo de combustible, aire y gases de combustión.



Figura 26. Instalación de los hornos terminada.

1.5 Indicadores de Funcionamiento de los Hornos⁵

Estando listo el sistema de inyección de aire con su respectiva instalación eléctrica y el sistema de evacuación de gases, se procederá a hacer las pruebas de funcionamiento de los hornos.

Los hornos de gas pueden ser del tipo⁶ de fuego directo, en el cual los productos de la combustión entran a la cámara de calentamiento. Alternativamente, pueden ser de combustión indirecta, donde la cámara del horno quede aislada de los productos de la combustión.

Antes de probar los hornos, es necesario establecer ciertos parámetros que sirvan de guía durante las pruebas. Esto determinará si están funcionando de manera óptima, para ello, se considera que todo horno posee un mecanismo de mezcla por medio del cual se asegura la estequiometría de la combustión, lo cual **se percibe por medio de la intensidad y color de la llama**, que es el indicador más importante que relaciona la eficiencia de la combustión con la temperatura a alcanzar.

A simple vista se puede percibir que el horno gris (revenido), tiene una boquilla por lo que se tiene un chorro de gas que entra en el quemador, mientras el horno azul de temple al ser completamente cerrado requerirá de un suministro de aire para mantener la combustión en su interior. Para poder analizar el funcionamiento de cada uno, es necesario considerar las implicaciones

1.5.1 Combustión por Difusión⁷

La combustión por difusión se caracteriza por tener un chorro de gas a la salida del inyector o boquilla, un claro ejemplo son los mecheros bunsen; el mecanismo dominante es la difusión de especies. Produce llamas más seguras, al no formarse mezcla reactiva hasta la salida del inyector. Se caracterizan por ser **amarillas también llamadas luminosas** y suelen presentar una combustión incompleta.

Las moléculas de los combustibles son tan inestables a altas temperaturas que cuando hay exceso de combustible o deficiencia de oxígeno, el excedente tiende a descomponerse por pirolisis dando como productos sustancias no totalmente oxidadas llamadas inquemados (aldehídos, hollín que es polvo de fórmula ponderal media C_8H de tamaño del orden de 10^{-8} a 10^{-5} m^3 y monóxido de carbono que es altamente tóxico si se respira aunque sea en moderadas

cantidades; puede causar la muerte por envenenamiento en pocos minutos porque sustituye al oxígeno en la hemoglobina de la sangre).

La llama que se genera emite luz amarilla-anaranjada porque las partículas sólidas absorben calor volviéndose incandescentes debido a la alta temperatura que soportan, produciéndose así gran pérdida de calor. Alcanza temperaturas de hasta 900 °C.

Debido a la naturaleza de esta combustión incompleta e ineficiente, se suele aprovechar el llamado efecto Venturi⁸, que consiste en un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado que disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor, así la diferencia de presión con el exterior provoca el ingreso del aire a la tubería, esta adición de aire al sistema se da antes de la zona de combustión, procurándose de este modo acercarse a la estequiometría. En el mechero bunsen se puede observar este principio aplicado, ya que en su diseño incorpora una camisa rotatoria que cubre un espacio abierto en su parte inferior por donde puede ingresar aire a la tubería del mechero, apreciándose una llama amarilla cuando la camisa cubre completamente el espacio, siendo así, solo habría gas al final del recorrido de la tubería. Al girar la camisa y dar paso al aire, se puede ver que cambia el color de la llama según el giro de la camisa hasta llegar a un color azul oscuro, con esto se obtiene una mezcla parcial dentro de la tubería que se completa con el aire circundante a la zona de combustión.



Figura 27. Imagen que refleja el cambio en el color de la llama según el suministro de aire al sistema durante la combustión.

1.5.2 Combustión con Inyección completa de Aire

Cuando la temperatura requerida es muy alta, se requiere un gasto aire-combustible mayor, por tanto, los hornos suelen ser completamente cerrados, requiriendo que todo el aire u oxígeno necesario para la combustión sea suministrado al sistema por medio de una inyección a presión, en este caso un turbo. Este diseño mejora la eficiencia energética y el confort térmico del operario.

La mezcla se debe realizar por tanto antes de la zona de combustión y asegurándose una mezcla estequiométrica (cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactivos y productos en el transcurso de una reacción química) o cercana a la estequiométrica que en condiciones normales no sería posible. La velocidad de la llama varía mucho con la composición y es máxima para una cantidad de oxígeno algo superior a la estequiométrica. Se caracterizan por **llamas azuladas también llamadas no luminosas**.

Al haber una adecuada proporción aire/combustible, todo el combustible se logra quemar produciéndose altas temperaturas, algunas de las moléculas creadas por la combustión, cuando se forman, ganan considerable energía. Esta energía es absorbida por sus electrones, que luego la remiten como fotones. El resultado es una llama de color azul (pudiendo llegar a ser invisible contra un fondo uniforme) debido a que casi no hay partículas sólidas incandescentes, obteniéndose así una gran cantidad de energía en comparación con la llama luminosa, esta alcanza temperaturas de hasta 1300 °C y en algunos casos, 1500 °C.

1.5.3 Prueba del horno de revenido

El horno de revenido presenta un chorro de gas a la salida del inyector; donde su mecanismo de mezcla es por difusión. La combustión se realiza en el quemador y posee 2 puntos de suministro de aire, el primero es a la entrada del quemador, por efecto Venturi, y el otro, a la salida del quemador con el aire circundante.



Figura 28. Izquierda, Inyector y entrada del quemador. Derecha, salida de la flauta.

De este modo, se realiza una mezcla aire-combustible a la entrada obteniéndose una “pre mezcla” dentro del quemador y la proporción se completa con el aire circundante de la flauta del quemador. Esto, teniendo $2\frac{1}{2}$ anillos en la camisa reguladora (fig. 29).



Figura 29. Anillos ($2\frac{1}{2}$) en la camisa reguladora de la mezcla aire-combustible.

Se realizó la prueba de encendido abriendo las válvulas lentamente desde la llave de paso principal del ramal del horno de revenido, hasta la válvula final (antes del inyector), determinándose una ignición relativamente segura. Con una apertura de $\frac{1}{4}$ de vuelta de la válvula dosificadora del inyector, se puede acercar una llama a la flauta para encender la mezcla. Así, se obtendrá una llama estable, a partir de la cual se podrá abrir más el flujo de gas.

Según los parámetros establecidos de la estequiometría de la combustión y del color de la llama resultante, se encontró que la apertura de gas adecuada es entre $\frac{3}{4}$ y 1 giro de la válvula de mariposa, obteniéndose así, la llama azulada sin trazos amarillos (imperceptible al tomar la foto con flash o al verla contra la pared blanca (fig. 30) que indica una óptima combustión sin pérdida de calor por partículas incandescentes.

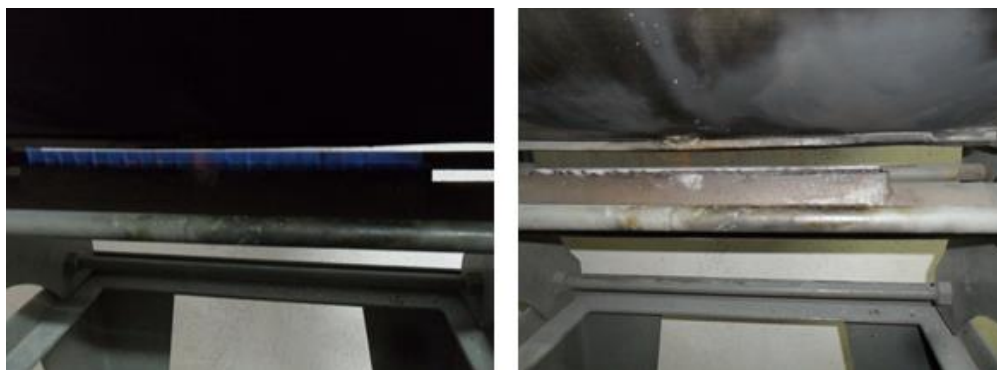


Figura 30 Izquierda, foto tomada con poca iluminación. Derecha, foto tomada con flash.

Cuando se inyectan los reactivos en el quemador, el movimiento creado puede ser de tipo laminar o turbulento, y ello modifica grandemente el desarrollo de la combustión. En régimen turbulento, el transporte de calor y masa de aire-combustible es mucho más efectivo; la llama es más corta y fluctuante, además de que genera ruido pero lo principal, es que la velocidad de quemado es más rápida porque el frente de la llama, tiene mucha mayor superficie y dentro del espesor de la llama, el transporte es más efectivo.

Al abrir la válvula dosificadora del gas, más de 1 vuelta, la llama empieza a tornarse amarilla (fig. 31 a). Luego, esta pasa de ser turbulenta a laminar (bordes más luminosos, definidos y sin ruido fig. 31 b) que también se tornará amarilla con el tiempo (fig. 31 c). Pasado un momento, debido a la acumulación de gas, se desestabiliza la llama dentro de la flauta y se produce una detonación donde la llama sale rodeando al inyector (fig. 31 d), luego la llama vuelve a ser turbulenta y azul (fig. 31 e) que se vuelve amarilla otra vez (fig. 31 a) repitiéndose un ciclo, cuya duración se acortará dependiendo del exceso de gas en el sistema.

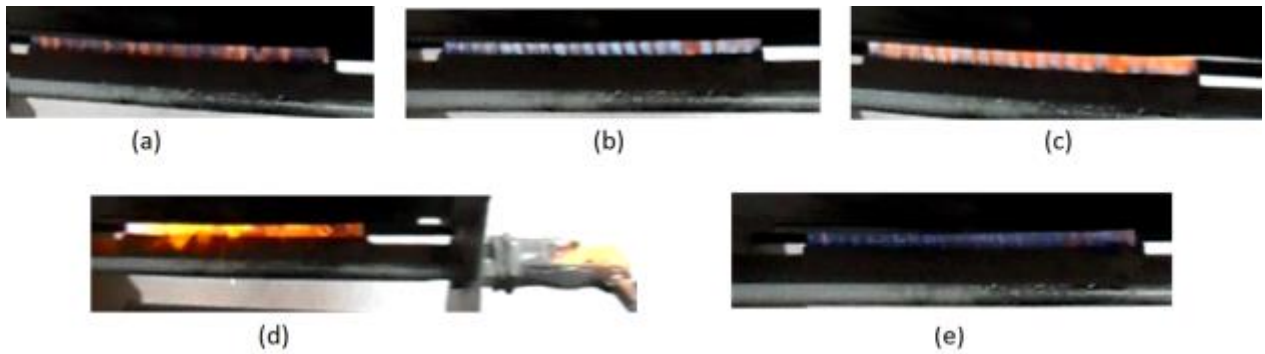


Figura 31. (a) Llama turbulenta con exceso de gas (b) Llama laminar inmediatamente después del cambio (c) Llama laminar un momento después del cambio (d) Detonación sucedida después de unos minutos (e) Llama turbulenta inmediatamente después de la detonación.

Luego de la detonación, es necesario cerrar ligeramente la llave del inyector para que se regule, y luego incrementarla, también ligeramente, hasta que de la llama azul que se quiere siempre dentro del parámetro de $\frac{3}{4}$ a 1 giro de la válvula de mariposa.

Como norma de seguridad, se considera necesario cerrar las válvulas de gas lentamente en orden opuesto al de encendido.

1.5.4 Prueba del horno de temple

El horno de temple es un horno de recámara cerrada y donde no hay espacio que permita una toma de aire secundaria de los alrededores, por tanto, está diseñado para que en la recámara de combustión entre la mezcla ya lista.

El procedimiento de encendido del horno, estando todas las válvulas del sistema de alimentación de gas cerradas y la del tanque de 100 Lb también, empieza por bajar el breaker, evitando así el riesgo de ignición por una chispa eléctrica si se llegase a dar alguna acumulación de gas dentro del recinto, debido a una fuga.

Luego se enciende el indicador de temperatura, el turbo desde la caja de arranque (botón verde) y se abre la válvula de paso del aire a $\frac{1}{8}$ de vuelta (considerándose $\frac{1}{4}$ de vuelta la apertura total) para así, eliminar dentro de la recámara cualquier partícula de humedad que pueda afectar el encendido.

Seguido, se abre el flujo de gas propano desde el tanque y la primera llave de paso hacia el horno de temple (la llave hacia el horno de revenido, no se abre), se

abre la válvula dosificadora del mechero bunsen $\frac{3}{4}$ de vuelta y se le enciende. A continuación, manteniendo las puertas del horno abiertas (para que haya algo de oxígeno y evitar una detonación dentro del horno si se llega a acumular mucho gas), se le coloca en el visor de la recámara de combustión para finalmente, abrir despacio la segunda válvula de gas (después de la válvula check) hasta $\frac{3}{4}$ de vuelta; así se logra obtener la llama estable dentro del horno (fig. 32 a). Conseguido esto, se procede a cerrar la válvula de gas del mechero y se retira de la cámara de combustión, después se procede a abrir más la válvula del aire hasta obtenerse una llama con poca luminiscencia (fig. 32 c).

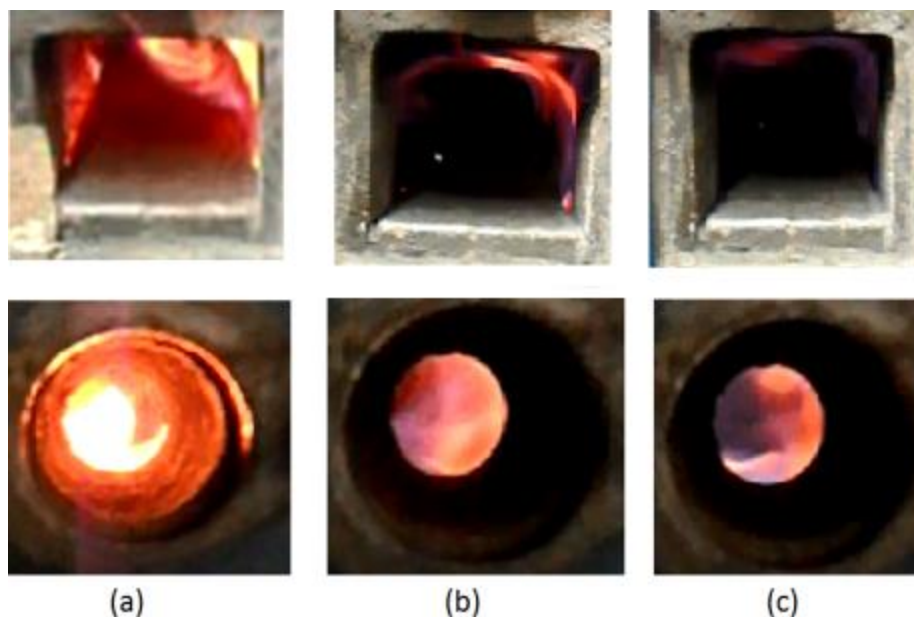


Figura 32. (a) Llama con exceso de gas (b) Llama con luminiscencia media (c) llama con baja luminosidad. Las imágenes inferiores corresponden al visor donde se coloca el mechero para la ignición.

Se notó que la pintura del Horno de Temple se empezó a descomponer producto de las altas temperaturas; esto debido a que el horno no debió pintarse desde un principio ya que es de un diseño viejo.

En la actualidad, los hornos poseen un aislamiento térmico externo que impide que la superficie se caliente; debido a que se busca mejorar la eficiencia y asegurar un ambiente de confort térmico tal y como sucede con los hornos eléctricos, de otra forma, se requeriría de una pintura especial que soportase altas temperaturas de costo elevado y de poco o ningún provecho ajeno a lo estético, cosa que vendría a ser un gasto innecesario porque el metal del que está hecho el horno no requiere protección.

Se encontró que el horno tenía dos capas de pintura, la externa es pintura convencional y debajo de esta, se encuentra la pintura de base; ambas se vieron afectadas por la temperatura. La primera se agrietó y empezó a caer, mientras que la pintura base se tornó suave y fácil de remover cuando hicimos una prueba en una pequeña zona. En otras partes, se evaporaba la pintura azul, a como se aprecia en la primera sección de la chimenea.



Figura 33. Pintura desprendiéndose.

Debido a las limitaciones en el suministro del gas, ambos hornos no pueden estar funcionando de manera simultánea ya que la intensidad y el tamaño de la llama, en el Horno de Temple, caen considerablemente.

Capítulo II

Montaje y Puesta en marcha del Sistema de Medición de Temperatura

Introducción

Los instrumentos de medición anteriormente usados eran por lo general analógicos de construcción especial por lo que no se encontraron debido al avance tecnológico en el mercado actual y las ventajas que las nuevas tecnologías traen consigo (menor tamaño, mejor manejo y versatilidad). Actualmente, para aplicaciones industriales, los instrumentos de medición más empleados son los termopares tipo "K" que según especificaciones generales, alcanzan una temperatura máxima de 1,350 °C por lo que se optó por emplear dicha tecnología en el horno pues las temperaturas en este proceso no sobrepasa estos límites.

2.1 Montaje del Termopar para horno de revenido

Ambos hornos poseen en la parte posterior un orificio donde iban los instrumentos de medición de temperatura anteriores. Teniéndose en cuenta que sólo un horno funcionará a la vez, la corta distancia entre los hornos y que el rango de temperatura del termopar tipo "K" abarca desde -50 a 1,350 °C (siendo que la precisión depende del indicador y no del tipo de termopar en sí), se decidió instalar un único sistema termopar-indicador.



Figura 34. Agujero donde entraba el instrumento de medición anterior.

Se instaló un termopar tipo bayoneta con una extensión 5 metros de longitud en la pared de atrás a una distancia equidistante entre los hornos. Este posee una longitud de penetración ajustable por medio de una rosca con una apertura a cada

lado para poder ser fijada con facilidad (fig. 35). El conector fijo, sobre el cual entra la rosca ajustable, quedó fijado a una lámina en el horno de revenido.



Figura 35. Termopar tipo bayoneta "K" con conector fijo y longitud de penetración ajustable.

2.2 Montaje del Termopar para Horno de Temple

Al Horno de Temple se le hizo un ajuste a la pieza posterior para que la rosca ajustable pueda sujetarse en su interior; así el termopar podrá intercambiar posiciones con facilidad.



Figura 36. Base con tornillo de sujeción para el antiguo instrumento de medición (el agujero llega hasta la recámara inferior).

2.3 Conexiones al Breaker y Medidor de Temperatura

Se seleccionó un indicador de temperatura (fig. 37) con temperatura máxima 1,000 °C (rango suficiente para llevar a cabo todas las pruebas del diseño experimento ya que la temperatura del temple no sobrepasa los 900 °C para estos aceros al carbono). El indicador de temperatura trae en sus pre ajustes, la configuración para el termopar tipo "K" admitiendo el rango de -50 a 1000 °C.

Para la alimentación eléctrica, admite 100-220 Vac por lo que se procedió a realizar la instalación usando una de las líneas del breaker y el neutro de la misma conexión del turbo.

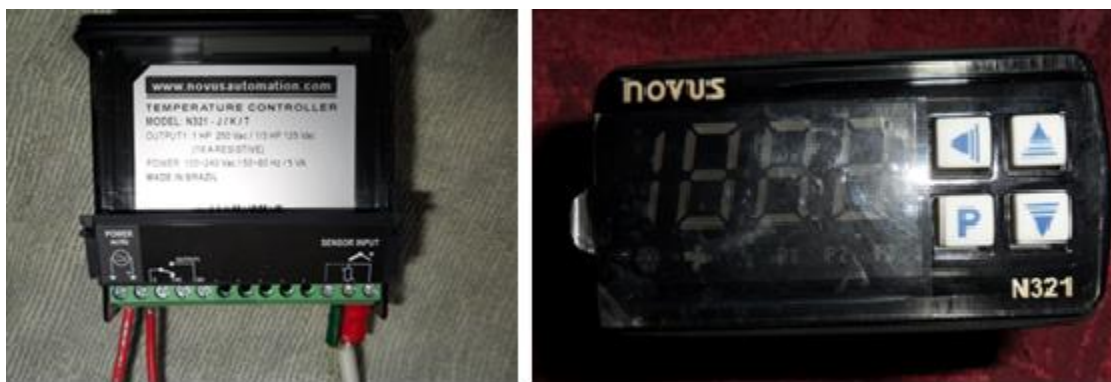
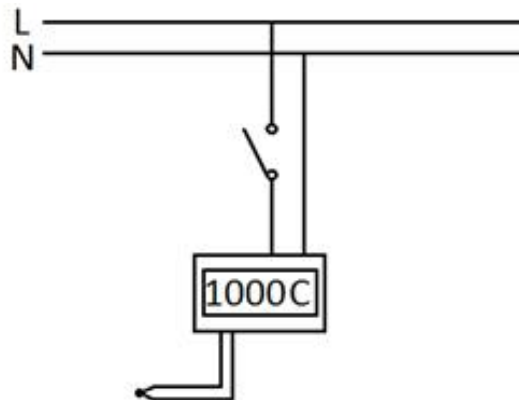


Figura 37. Indicador de Temperatura



Esquema 3. Conexión eléctrica del sistema de medición de temperatura.

Junto con la instalación eléctrica fue necesario construir una caja para que el indicador estuviese protegido del polvo y la humedad del ambiente; procurando su seguridad, se le incluyó un interruptor para apagarlo y encenderlo, de forma separada al breaker para evitar que se dañe el equipo.

2.4 Pruebas del Sistema

Realizada la conexión del termopar, se procedió a hacer las respectivas mediciones de temperatura para así determinar el tiempo y la temperatura máxima que alcanza cada horno.

2.4.1 Horno de Revenido

Primero, se determinó el tiempo que el Horno de Revenido tarda en calentarse. Se pudo apreciar que la temperatura máxima que alcanza es de 366 °C, suponiendo una apertura de válvula de gas de $\frac{3}{4}$ de vuelta y con la válvula de emisión de gas completamente cerrada. La construcción del horno está diseñada para que la transmisión de calor a la recámara sea por conducción, así, al cerrar la válvula de emisión de gases, se retiene ese calor, disminuyendo el tiempo de calentamiento. Manejando la apertura de esta llave de paso, se puede regular la temperatura. Esta temperatura que se alcanza en este horno es suficiente para los revenidos que se aplican.



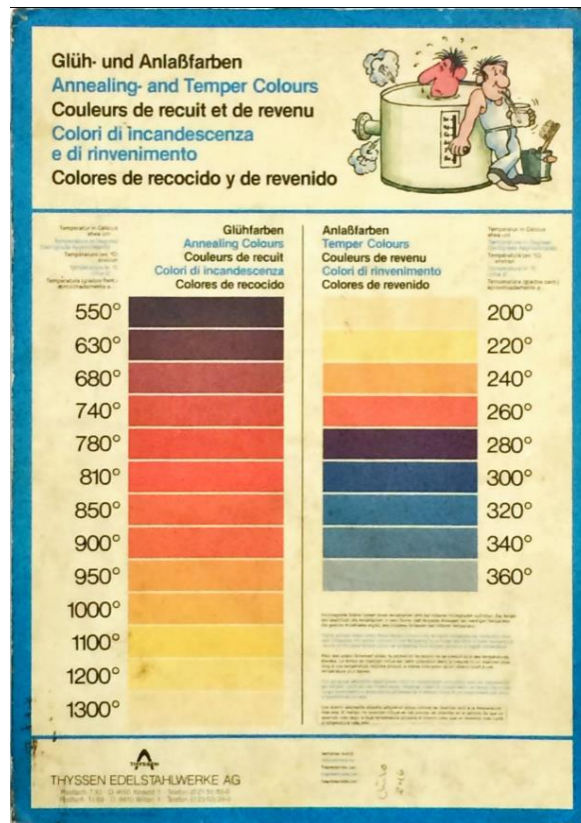
Gráfica 1 Temperatura - Tiempo de calentamiento del horno de revenido.

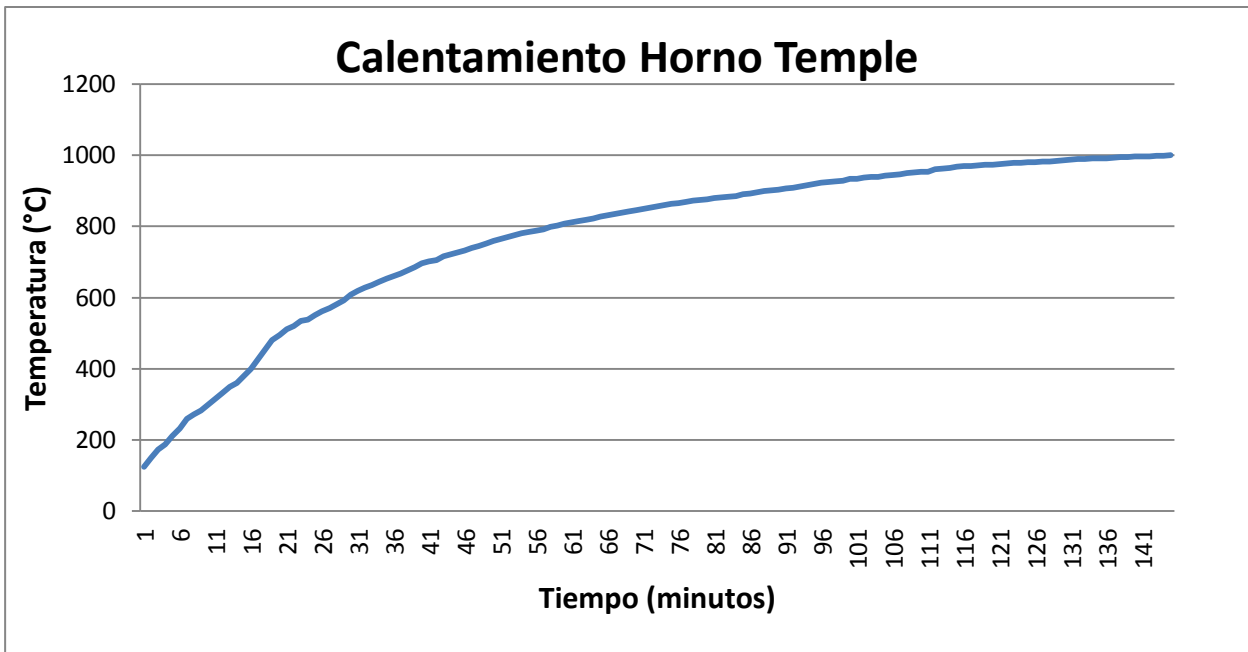
2.4.2 Horno de Temple

En el caso del Horno de Temple, la temperatura que se midió es la de la recámara inferior ya que aquí es donde se aloja el termopar y es donde se alcanza la mayor temperatura por su cercanía con la zona de combustión. Para la recámara

superior del horno la medición de temperatura se puede estimar en base al color de la pieza a tratar según la escala de la tabla de luminiscencia (Figura 38); Aspecto que debe tenerse presente para futuras modificaciones que permitan, a través de termopares, medir exactamente la temperatura en la zona donde está la pieza.

Figura 38. Escala de Luminiscencia para Aceros.





Gráfica 2 Temperatura - Tiempo de calentamiento del Horno de Temple.

2.4.3 Consumo de Gas

Posterior a las pruebas, se pesó el tanque de gas, determinándose un consumo de gas aproximado de 2 Lb/ h con el horno de temple y 1 Lb/ h en el caso del horno de revenido, con un costo de C\$ 11/ Lb. El flujo de gas que aporta el tanque puede variar según disminuya su contenido pero al no haber un gasómetro de propano disponible en la universidad solo se asumió el consumo total de cada prueba durante los ensayos.

Capítulo III
Pruebas de temple y revenido en los hornos

Introducción

Ya terminado todo lo necesario para el buen funcionamiento de los hornos, se dispuso la realización de pruebas de tratamiento térmico con probetas para comprobar así, su correcta operatividad e identificar cualquier inconveniente presente. Se consideró necesario realizar únicamente pruebas de temple y revenido donde se asegurase que se puede mantener la temperatura requerida durante el tiempo necesario, de igual manera se dará una descripción general de los tipos de tratamiento térmico.

3.1 Clasificación de los Tipos de Tratamiento Térmico⁹

En las aleaciones, el calentamiento por encima de cierta temperatura crítica provoca un cambio de la estructura de la aleación, produciéndose una transformación de fase.

En el Diagrama Hierro - Carbono pueden identificarse las fases que se presentan de acuerdo a la temperatura y el porcentaje de carbono en la aleación.

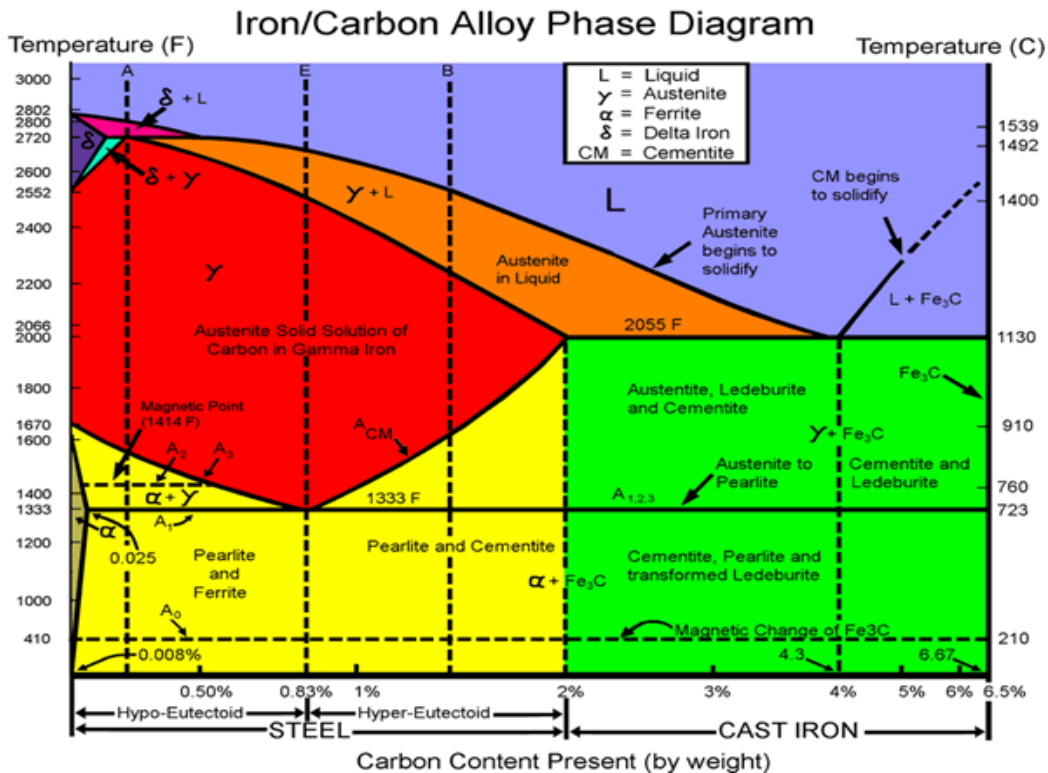


Fig. 39. Diagrama Hierro – Carbono¹⁰.

9. M. Martínez Baena. Tratamientos Térmicos de los Materiales Metálicos.
 10. Metalografía. Universidad Tecnológica de Pereira

3.1.1. Recocido

Su objetivo principal es "ablandar" el acero para facilitar su mecanizado posterior. También es utilizado para regenerar el grano o eliminar las tensiones internas. Se debe tener en cuenta que los recocidos no proporcionan generalmente las características más adecuadas para la utilización del acero y casi siempre el material sufre un tratamiento posterior con vistas a obtener las características óptimas del mismo. Cuando esto sucede el recocido se llama también "tratamiento térmico preliminar" y al tratamiento final como "tratamiento térmico de calidad". Los tipos de recocidos son los siguientes: recocido de regeneración (generalmente para piezas fatigadas), recocido de engrosamiento de grano, recocido de homogenización, recocidos subcríticos (de ablandamiento o de acritud), recocido isotérmico (transforma austenita en perlita) y recocido blanco.

3.1.2. Normalizado

Es un tratamiento térmico de recocido que consiste en calentar la pieza a normalizar por encima de la temperatura de transformación perlita-austenita se mantiene a estas temperaturas a un periodo de una hora y después se enfría al aire. Se realiza calentando el acero entre 20 °C y 40 °C superior a la temperatura crítica y una vez austenizado se deja enfriar al aire tranquilo. Con este tratamiento se consigue afinar y homogeneizar la estructura. Este tratamiento es típico de los aceros al carbono de construcción de 0.15% a 0.60% de carbono. Sirven para afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación forjada entre otros. Con esto se consigue un acero más duro y resistente al obtenido con un enfriamiento más lento en un horno después de un recocido. Este tratamiento se utiliza para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas.

La velocidad del enfriamiento del normalizado es más rápida que en el recocido. Las temperaturas normales del normalizado varían según el porcentaje en carbono, que va desde 840°C a 935°C. A medida que aumenta el diámetro de la barra, el enfriamiento será más lento y por tanto la resistencia y el límite elástico disminuirán y el alargamiento aumentará ligeramente.

3.1.3 Temple

El temple es un tratamiento térmico que consiste en enfriar muy rápidamente, la mezcla austenita homogénea, que tenemos después de calentar el acero, consiguiéndose un aumento de dureza, ya que el resultado microscópico final es una mezcla martensítica. La temperatura de temple para los aceros hipoeutectoides son de 30–60 grados, por encima de esta temperatura, el grano de austenita crece mucho, obteniéndose austenita basta de baja tenacidad. El tiempo de enfriamiento debe de ser rápido pero solo en el intervalo de temperatura de 650–400 grados, que es donde la austenita es menos estable , y es donde se forma la mezcla de ferrita y cementita , por encima de 650 grados la velocidad puede ser más lenta , pero no tanto que permita la precipitación de ferrita o la transformación de austenita en perlita, por debajo de los 400 grados comienza la zona de estabilidad de la austenita , y el enfriamiento puede volver a ser lento, y

en el intervalo de 200–300 grados, el enfriamiento debe de ser lento para evitar tensiones térmicas resultantes de un enfriamiento rápido.

El medio de enfriamiento también influye siendo este proceso por etapas , en la primera el acero al sumergirse en el líquido se forma una capa de vapor, al ser su temperatura muy alta, que rodea el metal , y el enfriamiento se hace por conducción y radiación a través de la capa gaseosa , siendo un enfriamiento muy lento.

En la segunda etapa cuando desciende la temperatura de superficie del metal, la película de vapor va desapareciendo, pero el líquido hierve alrededor de las piezas y se forman burbujas que transportan el vapor por conducción.

En la tercera etapa el enfriamiento lo hace el líquido por conducción y convección, cuando la diferencia de temperatura del líquido y la pieza es pequeña., con lo que el líquido influye en la velocidad según su temperatura de ebullición, su conductividad térmica, su viscosidad, su calor específico y su calor de vaporización.

Si se realiza un temple mal, nos podemos encontrar con defectos en la pieza como una dureza insuficiente para nuestros propósitos, que se hayan formados puntos blandos, piezas con mucha fragilidad, descarburación, grietas etc.

La dureza escasa y la formación de puntos blandos se explican por la falta de calentamiento, por no haber alcanzado la temperatura necesaria, o por no haber permanecido el suficiente tiempo en ella, la fragilidad excesiva es por un temple a temperaturas altas, etc.

Existe un proceso llamado temple superficial que se usa para endurecer superficialmente ciertas piezas de acero conservando la tenacidad de su núcleo, el proceso consiste en calentar las capas superficiales a una temperatura superior a los puntos críticos y enfriar rápidamente siguiendo la sección de la pieza , como las diferentes capas interiores de la pieza se han calentado a diferentes temperaturas , se ha producido en la pieza diferentes temples, en la superficie el temple será completo, en el interior, incompleto, y en el centro inexistente.

Hay diferentes métodos como el de calentamiento por llama oxiacetilénica, recomendado para piezas que por su forma o tamaño, no se pueden aplicar otros métodos, la ventaja de este método es que se pueden templar incluso partes de una pieza, el método de inducción, que usa el flujo magnético creado por una corriente alterna de alta frecuencia que pasa por un inductor, la característica más importante de este método es que para cada forma de pieza. Se le colocan unas espiras de una forma determinada, es el método más empleado ya que no se quema el carbono, no se produce oxidación, y no se forma cascarilla, el inconveniente principal es que no se puede utilizar para piezas únicas, ya que hay que crear un inductor específico para cada forma.

3.1.4 Revenido

Después del temple, los aceros suelen quedar demasiado duros y frágiles para los usos a los que están destinados. Esto se corrige con el proceso del revenido, este proceso consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior, enfriándolo luego al aire, en aceite o en agua, con esto no se eliminan los efectos del temple, solo se modifican, se consigue disminuir la dureza, resistencia, y las tensiones internas, y se aumenta la tenacidad.

El acero, después del temple, está compuesto por cristales de martensita, si se vuelve a calentar a diferentes temperaturas, entre temperatura Ambiente y 700° y después se enfría al aire, la resistencia a la tracción disminuye a medida que la temperatura del revenido aumenta, y al mismo tiempo aumenta la ductilidad y la tenacidad, la resistencia al choque o resiliencia, que es baja cuando el revenido se hace a temperaturas inferiores a 450°C, aumenta cuando se hace a t más elevadas. En ciertos aceros en los que después del temple queda austenita residual, se presenta un aumento de dureza, cuando el revenido se hace entre 350°C y 550°C, transformándose la austenita en otros constituyentes. Los aceros después del revenido, por lo general se contraen estas variaciones de propiedades que suceden en el revenido, se deben a los cambios microestructurales, que consisten en la descomposición de la martensita que se había obtenido en el temple y que se transforma en otros constituyentes más estables. La estructura obtenida en un revenido a 200–250°C es de martensita de red cúbica, a 400°C se observa un oscurecimiento fuerte, al aumentar a 600–650° se desarrolla la coalescencia de la cementita. Con ayuda del telescopio electrónico se ha podido llegar a la conclusión que el revenido se hace en tres etapas:

–La primera etapa se realiza a bajas temperaturas, menores de 300°C, y se precipita carburo de hierro épsilon y el porcentaje de carbono en la martensita baja a 0.25%, el carburo de hierro cristaliza en el sistema hexagonal, en los límites de los subgranos de la austenita, y la martensita cambia su red tetragonal a red cúbica.

–En la segunda etapa, solo se presenta cuando hay austenita retenida en la microestructura del acero, la cual se transforma en vainita, que al ser calentada a altas temperaturas también precipita en carburo de hierro, con formación final de cementita y ferrita. –En la tercera etapa, el carburo de hierro que apareció en la primera etapa, se transforma en cementita, cuando sube la temperatura. Se forma un precipitado de cementita en los límites y en el interior de las agujas de martensita, la cual al aumentar la temperatura. se re disuelve la del interior y se engruesa la del exterior, al subir más la temperatura.

Se rompe la cementita exterior, y a 600°C la matriz queda constituida por ferrita. Al final la martensita se ha transformado en cementita y ferrita. En los revenidos la martensita obtenida al temple, va perdiendo carbono que aparece en forma de

carburo épsilon, y cementita. Cuando después del temple aparece austenita residual, los cambios micro estructurales cuando empieza a calentar, son iguales a los anteriores, pero a 225°C comienza la descomposición de la austenita hasta los 400°C, produciéndose un oscurecimiento de la estructura. Cuanto más baja sea la temperatura del temple, la austenita residual será menos refractaria, y a mas temperatura del temple será más difícil conseguir la transformación isotérmica de la austenita.

Esta austenita sufre una precipitación de carburos complejos de alta aleación, y disminuye el contenido en carbono, después de esta precipitación y al enfriar, se transforma en bainita.

En algunas clases de aceros , el revenido entre 250–400° , se presenta una disminución de la tenacidad , que se produce en la tercera fase del revenido , cuando la cementita envuelve las agujas de martensita , la fragilidad aumenta cuanto mayor es la red de cementita , y a temperaturas mayores esta red desaparece , y aumenta la fragilidad.

3.1.5. Cementación

El templado y revenido proporcionan dureza a la pieza, pero también fragilidad. Por el contrario, si no se temple el material no tendrá la dureza suficiente y se desgastará. Para conservar las mejores cualidades de los dos casos se utiliza la cementación.

La cementación es un tratamiento termoquímico austenítico que se realiza al acero de bajo carbono (menos del 0.25%) que no está templado con el objetivo de enriquecer en carbono (más del 0.8 %) la capa superficial. El material se austenitiza en una atmósfera o en un ambiente rico en C, el cual difunde hacia el interior de la pieza, permitiendo a la austenita disolver altos porcentajes de éste. Se somete el carbono elemental a altas temperaturas (900-950 °C), para que se produzca su difusión dentro del material de la pieza.

La cementación tiene por objeto endurecer la superficie de una pieza sin modificación del núcleo, dando lugar así a una pieza formada por dos materiales, la del núcleo de acero con bajo índice de carbono, tenaz y resistente a la fatiga, y la parte de la superficie, de acero con mayor concentración de carbono, más dura, resistente al desgaste y a las deformaciones, siendo todo ello una única pieza compacta. El núcleo, debido al bajo contenido de carbono, no admite temple, queda tenaz y puede trabajar bajo cargas dinámicas, y la zona periférica adquiere temple a una profundidad de cerca de 1 mm haciéndose resistente al desgaste por rozamiento, condiciones requeridas en piezas como los engranes.

La cementación consiste en recubrir las partes a cementar de una materia rica en carbono, llamada cementante, y someterla durante varias horas a altas

temperatura (1000°C). En estas condiciones, el carbono irá penetrando en la superficie que recubre a razón de 0,1 a 0,2 mm por hora de tratamiento.

La pieza así obtenida se le da el tratamiento térmico correspondiente, temple y revenido, y cada una de las dos zonas de la pieza, adquirirá las cualidades que corresponden a su porcentaje de carbono. En ocasiones se dan dos temples, uno homogéneo a toda la pieza y un segundo temple que endurece la parte exterior.

La cementación encuentra aplicación en todas aquellas piezas que tengan que poseer gran resistencia al choque y tenacidad junto con una gran resistencia al desgaste, como es el caso de los piñones, levas, ejes, etc.

Cabe señalar que la cementación en lo posible debe usarse en aceros en los cuales no pueda crecer mucho el grano y se pueda templar directamente.

3.2 Aceros Seleccionados

Para el diseño del experimento a demostrar, seleccionamos un acero aleado y un acero al carbono de esta forma cubrimos las expectativas industriales. Se consiguieron aceros al carbono 1045 y 4140 (aleado); se cortaron 3 probetas de 8 mm de espesor de cada metal, obteniéndose un total de 6 probetas.

Primeramente es necesario conocer la composición química de estos para así determinar las condiciones requeridas para el tratamiento térmico. La norma SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) clasifica los aceros no aleados y de baja aleación de la siguiente manera.

Nº AISI:	Descripción	Ejemplo
10XX	Son aceros sin aleación con 0,XX % de C	(1010; 1020; 1045) ★
11XX	Aceros resulturizados (de fácil labrado)	(1118; 1137; 1145)
12XX	Aceros refosforados y resulturizados	(1211; 1213; 1216)
13XX	Aceros al manganeso	(1330; 1335)
2XXX	Aceros aleados al Ni	(2165; 2120; 2245)
23XX	Aceros aleados con 3,5% de Níquel	
25XX	Aceros con 5% de Níquel	
3XXX	Aceros al Cromo - Níquel	(3415)
4XXX	Aceros al molibdeno	
40XX	Aceros al Carbono – Molibdeno	(4024, 4023)
41XX	Son aceros aleados con Mn, Si, Mo y Cr	(4140; 4118) ★
43XX	Aceros aleados con Cr Mo y Ni	(4317)
46XX ó 48XX	Aceros aleados al Molibdeno - Níquel	
5XXX	Aceros aleados al Cr	(50B40; 5046)
51XX	Aceros aleados con bajo Cromo	(5160; 5120; 5115)
52XX	Aceros con medio contenido de Cromo	(52100)
53XX	Aceros con alto contenido de Cromo	
6XXX	Aceros aleados al Cromo Vanadio	(6118; 6150)
86XX ó 87XX	Acero al Níquel Cromo Molibdeno	(8617; 8627)
92XX	Acero al Manganeso Silicio	(9250; 9255; 9250)

Figura 40. Composición química de los aceros según Norma AISI.

Siendo los 2 últimos dígitos correspondientes al porcentaje de carbono tenemos:

- Acero AISI/SAE 4140: Cromo Molibdeno, 0.40% C.
- Acero AISI/SAE 1045: Acero al Carbono. 0.45% C:

3.3. Temperaturas seleccionadas para temple y revenido

Según recomendaciones de proveedores ^{11, 12} se tiene:

AISI 4140. Se austeniza a temperatura entre 830 - 850 °C y se da temple en aceite. Generalmente, se considera una permanencia de 2 min por cada 1mm de espesor. El revenido se da por dos horas a 200°C para obtener dureza de 57 RC y si se da a 315°C la dureza será de 50 RC.

AISI 1045. Se debe austenizar entre 800 y 845°C si se va a templar en aceite o entre 790-820°C si se va a enfriar en agua. El tiempo de permanencia es de unos 10 min por cada 25 mm de sección. En estado templado, se obtiene una dureza de 52-60 RC de acuerdo a la concentración de martensita obtenida por el temple. Las piezas templadas no deben presentar una dureza superior a 58 RC e inferior a 52 RC.

Conociéndose el porcentaje de carbono, determinamos las temperaturas a partir del diagrama hierro carbono:

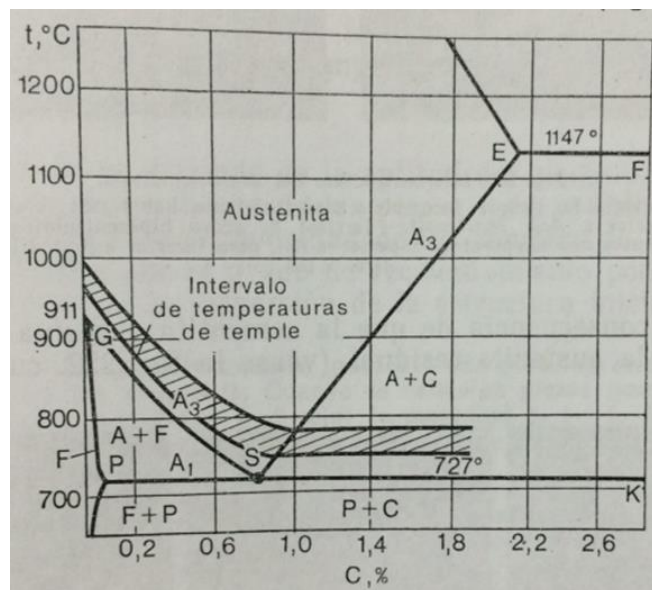


Figura 41. Intervalo óptimo de temperaturas de temple del acero al carbono.

La temperatura del temple se suele tomar según las recomendaciones del proveedor, pero en general puede considerarse de 30 a 60 °C sobre la temperatura crítica superior teniéndose únicamente austenita.

Según el diagrama Hierro-Carbono para 0.45% de Carbono se tiene una temperatura de 760°C y para 0.4% de Carbono aproximadamente 770 °C, por lo que se determinó que para ambos casos el rango de temperaturas, en el cual había de mantenerse la pieza, está entre 790 a 830 °C.

Para el Temple del acero al carbono aleado 4140 se eligió 830-845 °C con un tiempo de permanencia 16 min. El medio de enfriamiento recomendado es el aceite ya que el enfriamiento con agua sería muy rápido por lo que se podrían producir deformaciones y fracturas en las probetas.

Para el temple del acero al carbono 1045 el tiempo de permanencia se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{10 \text{ min}}{T_p} = \frac{25 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \quad T_p = \frac{8 \times 10 \text{ min}}{25} = \frac{80}{25} \text{ min} = 3.4 \text{ min} \approx 4 \text{ min}$$

Viéndose posible tanto el temple con aceite o agua para la misma temperatura se optó por usar agua en este caso.

Revenido de ambos aceros: todas las piezas se someten inmediatamente después del temple a un revenido entre una y dos horas entre 200 y 600 °C. Debido a que el horno permite revenido medio de 367 °C. Se fijó una temperatura de 300 °C.

La duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25 mm de espesor o diámetro.

$$\frac{2 \text{ h}}{T_p} = \frac{25 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \quad T_p = \frac{8 \times 2 \text{ h}}{25} = \frac{16}{25} \text{ h} = 0.64 \text{ h} \approx 38 \text{ min}$$

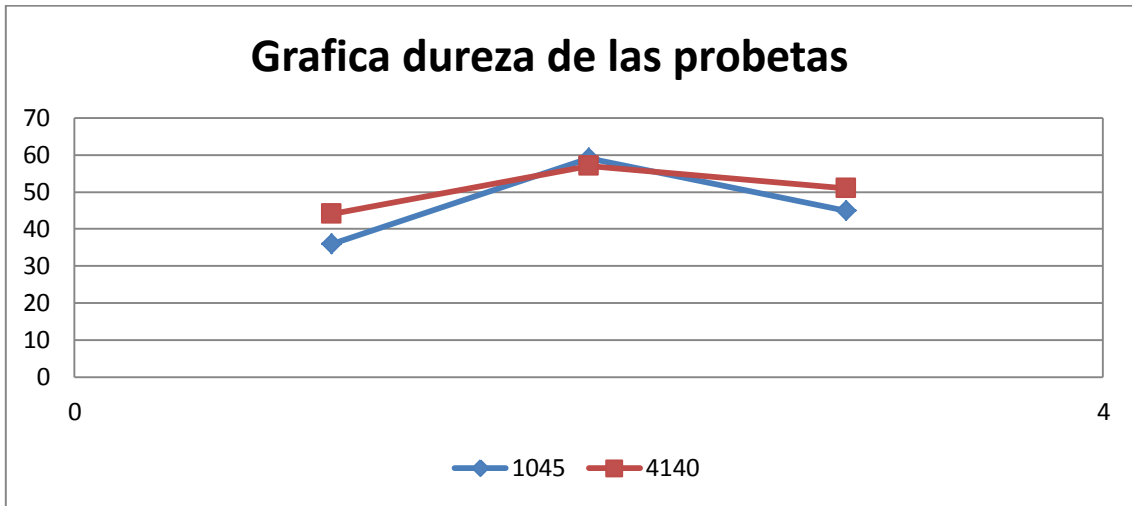
Teniéndose así que para los 8mm el tiempo puede ser entre 19 y 38 min, se decidió 30 min como tiempo de permanencia para ambas piezas. La duración total del proceso se mantuvo en 2 horas.

3.4. Curvas de dureza alcanzadas

Primero, se realizaron las mediciones de dureza a las probetas, previas al temple. El equipo se calibró con un patrón de 58.4 HRC.

Tabla 3. Dureza de las probetas previas al temple

Acero	Previas al T.T.			Después del temple			Después del revenido		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4140	45,42	45,43	45,45	56,56	58,56	58,57	52,51	51	52
1045	38,35	35,37	37,36	58,60	58, 60	58,58	46,45	45	45



Gráfica 3. Grafica del cambio de dureza obtenido en las probetas.

Las durezas encontradas corresponden a las previstas según la información de los proveedores. Teniéndose después del temple un notable aumento en la dureza previamente medida en cada probeta, y después del revenido se observó la característica pequeña disminución de dureza.

TEMPERATURA DE REVENIDO Y DUREZA OBTENIDO

Grado	Cont. de C. %	Dureza HRC después del revenido durante 2 h. para diferentes temperaturas (°C)									Tratamiento térmico
		205	280	315	370	425	480	540	595	650	
Acero al carbono templado en agua											Normalizado a 900°C temple en agua 830-845 °C promedio punto de rocío t. 16 °C
1030	0.30	50	45	43	39	31	28	25	22	95	
1040	0.40	51	46	46	42	37	30	27	22	94	
1050	0.50	52	50	45	44	40	37	31	29	22	
Acero aleado templado en aceite											Normalizado a 870 °C Templado en aceite desde (830-845) °C ; Promedio punto de rocío. 16 °C
1340	0.40	57	53	50	46	44	41	38	35	31	
3140	0.40	65	52	49	47	41	37	33	30	26	
4140	0.40	57	53	50	47	45	41	36	33	29	

Figura 42. Temperatura de revenido y dureza obtenida¹³

En la tabla anterior se puede observar de igual manera, que para las condiciones seleccionadas de temperatura y medio de enfriamiento hay parámetros de dureza ya documentados, teniéndose así que los resultados que se obtuvieron en las pruebas corresponden a los establecidos en la literatura, asegurándose la correcta operatividad de ambos hornos.

VI. Conclusiones

Terminadas las pruebas en los hornos se puede concluir lo siguiente:

1. Se realizó la revisión de los elementos del horno y el montaje de toda la instalación sistema de inyección, turbo, sistema de evacuación de gases e instrumentación del horno cumpliéndose lo objetivos propuestos.
2. Se diseñó el sistema de alimentación de gas híbrido cobre-hierro galvanizado que conectase ambos hornos con el tanque de gas y se construyó una base de concreto para la colocación del mismo.
3. No se encontraron, ni se pudieron identificar los instrumentos de medición de temperatura que los hornos poseían anteriormente, pero si se determinó posible la sustitución de estos con termocuplas que son la tecnología actual en medición de temperatura sin afectar ni limitar la capacidad de los hornos.
4. Se corre el diseño de experimento a partir de la selección de dos aceros ampliamente empleados en la industria metal mecánica lográndose los valores registrado de dureza en la literatura.
5. Se comprueba de acuerdo a la literatura especializada que el calentamiento por gas tiene como ventaja la economía y como inconveniente la dificultad del control de la temperatura por ello se emplea poco este proceso de calentamiento para tratamientos térmicos.

VII. Recomendaciones

1. La temperatura de la recámara superior del horno de temple no es igual a la de la recámara inferior se recomienda en un futuro colocar un termopar en esta zona que nos permita una medición más exacta de este parámetro.
2. Las limitaciones del suministro de gas de un solo tanque, no permite el funcionamiento adecuado de ambos hornos de manera simultánea, haciendo caer la potencia del horno de temple.
3. Se recomienda mantener siempre cerrada la válvula principal del gas mientras los hornos no estén en funcionamiento como medida de seguridad.