

“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”

Patricio Geovanny Aguirre Gonzaga, Boris Alexander Sánchez Andrade.

patogeova_85@hotmail.com

basanchez86@gmail.com

Ing. José Eduardo Meythaler Naranjo, Ing. Milton Fabricio Pérez Gutiérrez.

jemeythaler@espe.edu.ec

mfperez3@espe.edu.ec

Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga, Carrera de Ingeniería

Electromecánica

Quijano y Ordoñez y Hermanas Páez

Cotopaxi – Ecuador

RESUMEN:

Este proyecto será ejecutado por la empresa de calzado “CALZADO CASS” con el afán de mejorar la calidad de la producción de calzado, y dar un mejor servicio al consumidor final. El proyecto consiste en el diseño, construcción y automatización de un horno eléctrico, para lo cual el diseño cumplirá con los estándares de seguridad establecidos. El material que será calentado es el Polyol y el Prepolymer, este nos servirá para la fabricación de las plantillas que serán usadas en los distintos tipos de zapatos. El tipo de horno que se va a construir es un horno eléctrico, donde el elemento que proporciona la energía calorífica serán las resistencias eléctricas, para la adquisición de datos se utilizará una termocupla tipo “J” industrial la cual enviará los datos hasta el controlador de temperatura. Posterior a la automatización se realizarán las pruebas de campo, las que nos ayudarán a establecer la eficiencia del horno en su proceso.

Palabras claves:

Horno eléctrico, Controlador de temperatura, Termocupla, Polyol, Prepolymer.

ABSTRAC:

This project will be implemented by the shoe company "SHOE CASS" in an effort to improve the quality of footwear production and provide better service to the consumer. The project consists of the design, construction and automation of an electric oven, which design to meet safety standards set. The material to be heated is the Polyol and Prepolymer, this servira us for making the templates that will be used in different types of shoes. The type of furnace that is going to build an electric furnace, where the element that provides the heat energy will be electric immersion for data acquisition a "J" type thermocouple industry which will send data to the controller will be used temperature. After the automation field tests will be

conducted, which will help us to establish the efficiency of the furnace in the process.

Keyword:

Electric oven, Temperature controller, Thermocouple, Polyol , Prepolymer.

I.- INTRODUCCIÓN.

La empresa de Calzado CASS se encuentra ubicada en la ciudad de Ambato en el barrio Guachi Chico, esta empresa familiar está dedicada a la fabricación de todo tipo de calzados tanto para hombre como para mujer, sus calzados son realizados a base de cuero y con plantillas de una mezcla de Polyol y Prepolymer.

El material utilizado para la elaboración de las plantillas de zapatos son una mezcla de Polyol y Prepolymer, estos dos materiales vienen separados en tanques metálicos de 58,5 cm de diámetro por 89 cm de alto, los tanques son calentados en el horno a 80°C por un tiempo de 24 horas, luego el material por separado es reubicado en tanques metálicos pequeños lo cual facilita su maniobra, los tanques pequeños de Polyol y Prepolymer, son calentados en el horno a 80°C durante 4 horas antes de ser montados en la maquina inyectora de plantillas.

II.- FUNDAMENTO TEÓRICO.

1. POLYOL Y PREPOLYMER.

El poliuretano es un material muy usado en la fabricación de suelas en la industria del calzado debido a sus características de flexión, confort y resistencia a la abrasión.

Su versatilidad y sus propiedades físicas robustas lo han convertido en un material de elección para muchos fabricantes de calzado.

1.1 Polyol.

Los polyoles son líquidos viscosos, cuya principal característica química son los grupos hidroxilo (OH), constituidos por oxígeno e hidrógeno. Estos grupos reaccionan con los grupos Isocianato del Polisocianato dando lugar a grupos uretanos.

Los polyoles destinados a la fabricación de espuma rígida se obtienen fundamentalmente del óxido de propileno, la funcionalidad de un Polyol indica el número de grupos hidroxilo existente en la molécula.

1. HORNOS ELÉCTRICOS DE RESISTENCIAS.

Los hornos eléctricos por resistencias o más conocidos como hornos industriales, son equipos o dispositivos utilizados en la industria, en las que se calientan piezas o elementos colocados en su interior por encima de una temperatura ambiente.

3. FACTORES PARA UNA CORRECTA ELECCIÓN DE UN HORNO DE RESISTENCIAS.

Para la elección correcta de un horno de resistencias eléctricas, se debe tener en cuenta los tres criterios principales que son detallados a continuación:

- Requerimiento y datos del usuario.
- Posibilidades tecnológicas del constructor.

- Posibilidades económicas.

4. REQUERIMIENTO Y DATOS DEL USUARIO:

Entre las exigencias técnicas, se debe resolver un problema concreto de fabricación dentro de un contexto industrial como se indica a continuación:

Carga a tratar:

- Naturaleza y forma de la carga.
- Naturaleza del material.
- Temperatura inicial.

Tratamiento:

- Ciclo temperatura-tiempo.
- Temperatura normal de utilización, máxima y mínima.
- Precisión de temperatura requerida.
- Presencia o no de atmósfera controlada.

Producción:

- Producción horaria o por ciclo/carga.
- Utilización del equipo (horas, días, semanas, etc.).

5. MECANISMO DE CONDUCCIÓN DEL CALOR.

Existen tres mecanismos diferentes de transferencia de calor, que se detallan a continuación:

5.1. 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, ver la **figura 1**.

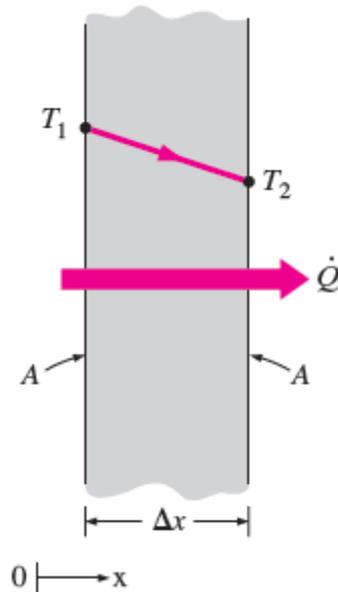


Figura 1: Conducción de calor a través de una pared plana. (Cengel, 2011)

5.2. Convección.

En la transferencia de calor por convección se da cuando el calor es transferido por el movimiento relativo de partes del cuerpo calentado de forma natural o forzada, como indica la **figura 2** y **figura 3**.

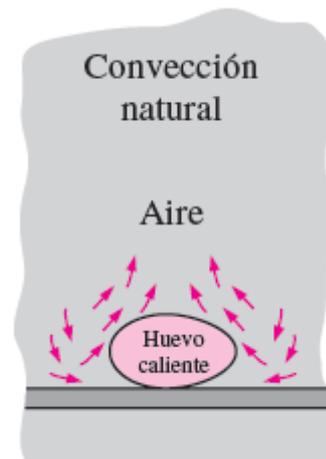


Figura 2: Convección natural. (Cengel, 2011)

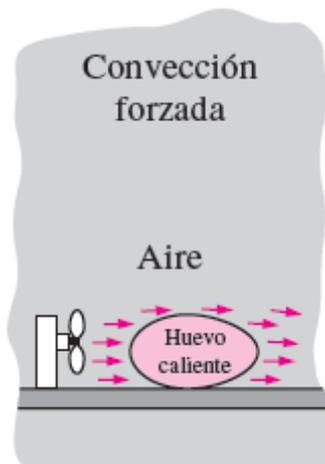


Figura 3: Convección forzada. (Cengel, 2011)

5.3. Radiación.

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor, ver la **figura 4**.

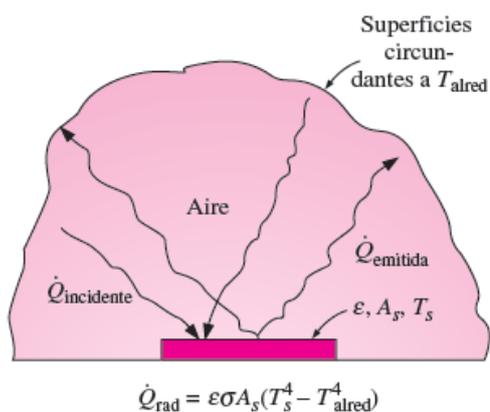


Figura 4: Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan. (Cengel, 2011)

6. LANA DE VIDRIO.

La lana de vidrio es una fibra mineral fabricada con millones de filamentos de vidrio unidos con un aglutinante, ver la **figura 5**.



Figura 5: lana de vidrio. (Souyet, 2011)

6.1 Propiedades de la lana de vidrio.

- Las propiedades que tiene la lana de vidrio son las siguientes:
- Resistencia Térmica.
- Absorción Acústica.
- Incombustible.
- Suavidad para una aplicación fácil.
- Liviandad.
- Libre de putrefacción.
- No nocivo para el medio ambiente.

7. HORNOS DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.

El calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser de forma directa, cuando la corriente eléctrica pasa por las piezas, o indirecto, cuando las piezas se calientan por radiación, convección o una combinación de ambas, procedente de las resistencias propiamente dichas dispuestas en las proximidades de las piezas.

En la **figura 6**, se muestran dos tipos de equipos de calentamiento por resistencia directa, la pieza se somete a una corriente eléctrica de baja tensión.

El calentamiento por resistencia directa es adecuado para piezas metálicas de gran longitud y sección pequeña y uniforme, tales como barras, palanquillas, varillas, alambres y pletinas.

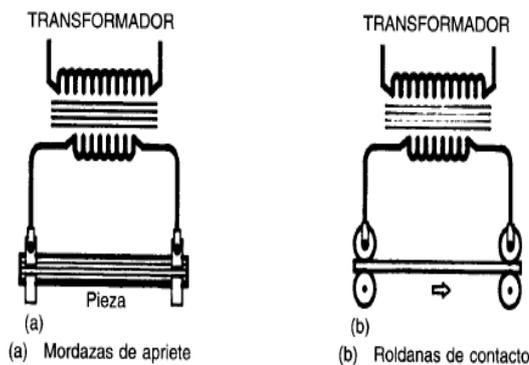


Figura 6: Equipos de calentamiento directo, intermitente y continuo.

(Astigarraga Urquiza, 1994)

7.1. Cálculo de las resistencias metálicas.

La potencia máxima que puede disponerse en el interior de un horno con resistencias metálicas depende de la temperatura máxima y de la disposición que se adopte para las mismas, en la **figura 7**, señala dicha potencia máxima para cuatro disposiciones típicas:

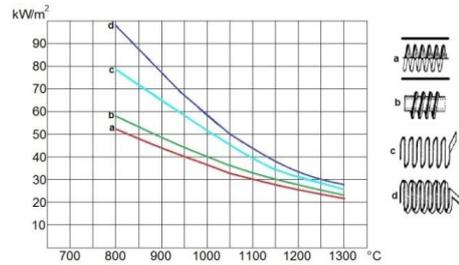


Figura 7: Potencia específica máxima en hornos. (Astigarraga Urquiza, 1994)

- a) Alambre arrollado en espiral o pletina ondulada sobre ranuras.
- b) Alambre arrollado en espiral sobre tubos cerámicos.
- c) Alambre ondulado y dispuesto verticalmente con soportes de gancho.
- d) Pletina ondulada y dispuesta verticalmente con soportes de gancho.

7.2. Partes constitutivas del horno eléctrico.

Después de analizar las diferentes aplicaciones que se les puede dar a los hornos eléctricos por resistencias dentro de la industria, ya sea en relación con el procedimiento o proceso a utilizar, los cuales pueden ser: sinterizado y calcinación, fusión de metales, tratamientos térmicos, recubrimiento de piezas metálicas, secado o reducción de humedad, procesos químicos, y otros procedimientos.

Se concluye que los tipos de hornos eléctricos muestran grandes y numerosas ventajas técnicas y económicas en su utilización, tanto por su versatilidad, costos, tamaño, resistencia y durabilidad.

Para lo cual un horno eléctrico de resistencias está constituido de las siguientes partes principales:

- Estructura metálica.
- Cámara de calefacción.
- Circulación de aire forzado o natural.
- Elementos de resistencia (resistencias de calentamiento).
- Control de temperatura y potencia.

8. DISEÑO Y SELECCIÓN.

El capítulo anterior fue el preámbulo para la construcción de un horno eléctrico de calentamiento, el cual contendrá diseños estructurales en función de las ecuaciones que se detallaran a continuación.

8.1. Ecuación para determinar el calor acumulado en las paredes del horno.

Siendo el régimen estacionario, la densidad del flujo calorífico es constante e igual para todas las capas por lo tanto para el cálculo del calor acumulado en las paredes del horno se determina mediante la ecuación (2. 1). (Mills, 1997).

$$q = \frac{T_{int} - T_{\alpha}}{\frac{1}{h_{int}A} + \frac{X_1}{K_1A} + \frac{X_2}{K_2A} + \frac{X_3}{K_3A} + \frac{1}{h_{\alpha}A}} \quad (2.1)$$

Dónde:

T_{int} = Temperatura de diseño del horno.

T_{α} = Temperatura ambiente.

$X_1=X_3$ = Espesor de las placas de acero.

X_2 = Espesor de la lana de vidrio.

$K_1=K_3$ = Constante de conductividad del acero.

K_2 = Constante de conductividad de la lana de vidrio.

A = Área de la pared lateral del horno.

h_{ext} = Coeficiente de transferencia de calor externo interno.

h_{α} = Coeficiente de transferencia de calor interno.

8.2. Ecuación para el cálculo del calor suministrado por el horno para un ciclo de trabajo.

La cantidad total de calor suministrado por el sistema, es igual a la cantidad de calor absorbido por la carga más las pérdidas de calor producidas durante el tiempo que dura un ciclo de trabajo, la cantidad de calor total suministrado por el sistema se calcula con la ecuación (2. 2).

$$Q_s = Q_p + Q_{Carga\ Total} \quad (2.2)$$

Dónde:

Q_s = Calor suministrado por el sistema

Q_p = Pérdidas de calor

$Q_{Carga\ Total}$ = Calor total absorbido por la carga

Pero las pérdidas de calor se producen por la acumulación de calor en las paredes de la cámara, debido a la conducción, las pérdidas de calor se deben también a la radiación y convección desde la superficie libre del horno (parte exterior del horno) hacia el medio circulante, por lo tanto tendremos la siguiente ecuación (2.3).

$$Q_p = Q_{kT} + Q_{CT} + Q_R \quad (2.3)$$

Dónde:

Q_p = Pérdidas de calor.

Q_{kT} = Pérdidas por conducción.

Q_{CT} = Pérdidas por convección.

Q_R = Pérdidas por radiación.

8.3. Ecuación para determinar las pérdidas de calor por conducción.

Para determinar la pérdida de calor por conducción en el interior del horno, se utilizara la ecuación (2. 4) (Holman J., 1999)

$$Q_k = m * C_p * \Delta T \quad (2.4)$$

Dónde:

Q_k = Calor acumulado debido a la conducción [Kcal]

m = Masa del cuerpo que acumula el calor [Kg]

C_p = Calor específico del cuerpo [Kcal/(Kg⁰C)]

Δt = variación de temperatura [°C].

8.4. Ecuación para determinar las pérdidas de calor por convección.

Los procesos de convección libre se expresan en función de los tres parámetros adimensionales Nu (Número de Nusselt), Pr (Número de Prandlt) y Gr (Número de Grashof). (Holman J. , 1999)

Como generalmente se desea calcular el coeficiente de película (h_c), implicado en ($Nu=h_c*L/k$) el proceso de convección libre se presenta mediante las siguientes ecuaciones:

$$Nu_u = F(Gr, Pr) \quad (2.5)$$

$$Gr = (\Delta T * \beta) * \frac{L^3 * \rho^2 * g}{u^2} \quad (2. 6)$$

$$Pr = \frac{u * CP}{k} \quad (2. 7)$$

En todas las expresiones de convección libre es acostumbrado calcular las propiedades del fluido (aire) a la temperatura media de película como indica la ecuación (2. 8).

$$T_m = \frac{T_s + T_f}{2} \quad (2.8)$$

Dónde:

T_m = Temperatura media.

T_s = Temperatura de la superficie de la chapa de acero.

T_f = Temperatura del fluido ambiente (aire).

Nu_u = Número de Nusselt (adimensional).

Gr = Número de Grashof (adimensional).

Pr = Número de Prandlt (adimensional).

Por lo tanto el análisis de Nu_u , Pr y Gr depende si el régimen del aire si es laminar o turbulento en el exterior del horno para lo cual se usara las siguientes condiciones.

8.4.1. Régimen laminar.

$$Gr * Pr < 10^9$$

$$Nu_u = 0.68 + \frac{0.670(Gr * Pr)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (2. 9)$$

8.4.2. Régimen Turbulento.

$$Gr * Pr > 10^9$$

$$Nu = 0.10(Gr * Pr)^{1/3} \quad (2. 10)$$

Coficiente de película convectivo, está representada de la siguiente forma, ecuación (2. 11).

$$hc = \frac{N_u * K}{L} \quad (2.11)$$

Por lo tanto, la pérdida de calor por convección en el exterior del horno se calcula con la siguiente ecuación (2.12)

$$Q_c = hc * A * \Delta T \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right) \quad (2.12)$$

8.5. Ecuación para determinar las pérdidas de calor por radiación.

Las superficies emiten y absorben energía radiante con diferente intensidad según la temperatura que tengan, y la naturaleza de su propia superficie, la mayor parte de cuerpos sólidos son opacos, la cantidad de calor transmitida por radiación viene expresada mediante la ecuación (2.13): (Holman J., 1999).

$$Q_R = \varepsilon * \tau * A(T_s^4 - T_a^4) \quad (2.13)$$

Dónde:

Q_R = Calor transmitido por radiación [Kcal/h]

ε = Emisividad de la superficie emisora 0.066, Anexo: C. (Holman J. 1999)

τ = Constante universal de Stefan-Boltzman 5.67×10^{-8} [W/ (m² K⁴)]

T_s = Temperatura de la superficie emisora 30°C=303°K

T_a = Temperatura ambiente 10°C=283°K

A = Área de la superficie emisora 1.372 m²

8.6. Ecuaciones para determinar la distribución de temperaturas.

Para obtener las ecuaciones que determinan dicha distribución de temperaturas, se debe establecer un

balance energético para cada punto de pared (0, 1, 2,..., 12) tomando en cuenta las condiciones de borde que presentan dichos puntos (conducción, convección, radiación), de ésta manera se tendrá:

8.6.1. Balance térmico para el punto nodal 0.

La figura 8, nos muestra en forma detallada los puntos 0, 1 y 2 en los cuales se va a determinar la temperatura en dichos puntos.

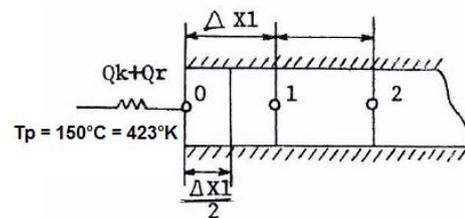


Figura 8: Sección de Pared que Incluye el Punto Nodal 0. (Holman J., 1999)

La variación de energía interna en el punto nodal 0, se debe a la transmisión de calor por radiación (que emiten los elementos de resistencia), más el calor por conducción (elementos de resistencia aislados en la pared), el balance térmico en el punto nodal 0, se calcula con la ecuación (2.14) y (2.15). (Holman J., 1999).

$$\rho_0 * \frac{\Delta x_1}{2} * Cp_0 * \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = \frac{K}{\Delta x_1} [T_0(t) - T_1(t)] + \delta * F_R - p[T_r(t)^4 - T_0(t)^4] \quad (2.14)$$

Balance Térmico en el Punto Nodal 0

$$\frac{\Delta T_0}{\Delta t} = \frac{T_0(t + \Delta t) - T_0(t)}{\Delta t} \quad (2.15)$$

Dónde:

F_{R-p} = Factor de forma (Cuantifica la cantidad de energía calorífica que emite la resistencia y que llega a la pared).

δ = Constante universal.

T_r = Temperatura de los elementos de resistencia.

T_0 = Temperatura en el punto 0.

Reduciendo la ecuación (2.14), en función del Módulo Fourier (M) se tienen las ecuaciones (2.16), (2.17) y (2.18)

$$M = \frac{\Delta X^2}{a \Delta t} \quad (2.16)$$

$$a = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (2.17)$$

Dónde:

M = Módulo de Fourier

ΔX = Intervalo de distancia [m]

A = Difusividad térmica [m^2/h]

Δt = Intervalo de tiempo [h]

K = Conductividad térmica [Kcal/(m.h.°C)]

ρ = Densidad [Kg/m^3]

C_p = Calor Específico [Kcal/(Kg°C)]

$$T_0(t + \Delta t) = \frac{2}{M} * T_0(t) + T_0(t) - \frac{2}{M} * T_1(t) + \frac{2}{M} * R[T_r^4(t) - T_0^4(t)] \quad (2.18)$$

8.6.2. Balance térmico para el punto nodal 1.

El balance térmico analizado en el punto nodal 1, corresponde al análisis en la chapa de acero que se encuentra en el

interior del horno, como muestra la figura 9.

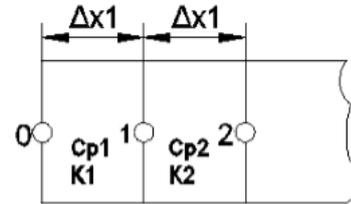


Figura 9: Sección de Pared que Incluye el Punto Nodal 1. (Holman J. 1999)

En estos puntos la transmisión de calor se produce por conducción, como se indica en la ecuación (2.19).

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{T_1(t + \Delta t) - T_1(t)}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Reduciendo la ecuación (2.14). En función de M, nos queda la siguiente ecuación (2.20):

$$T_1(t + \Delta t) = \frac{T_0(t) - T_2(t) + T_1(t)(M - 2)}{M} \quad (2.19)$$

8.6.3. Balance térmico para el punto nodal 2.

Se supone que el contacto térmico entre las superficies es ideal, es este punto la transmisión de calor imperante es la conducción; se considerará las propiedades de los materiales (chapa de acero y aislante), que están en contacto directo, como se muestra en la figura 10.

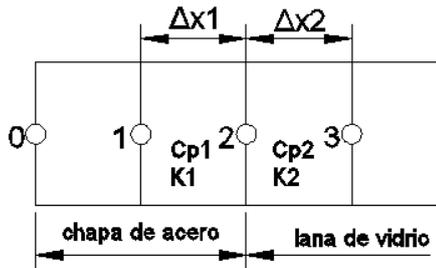


Figura 10: Sección de Pared que Incluye el Punto de la Intercara 2.

(Holman J. , 1999)

El balance térmico en el punto nodal 2, se demuestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 &T_2(t + \Delta t) \\
 &= \frac{\frac{K_1}{\Delta X_1} * T_1(t) + \frac{K_2}{\Delta X_2} * T_3(t)}{\frac{M}{2} \left(\frac{K_1}{\Delta X_1} + \frac{K_2}{\Delta X_2} \right)} \\
 &+ \frac{M - 2}{M} * T_2(t)
 \end{aligned} \tag{2. 20}$$

Balance Térmico en el punto de la Intercara 2

8.6.4. Balance térmico para el punto exterior de la pared.

En este punto nodal exterior de la pared, se tienen las tres formas de transferencia de calor, las cuales son por conducción, convección y radiación, como se muestra en la siguiente **figura 11**.

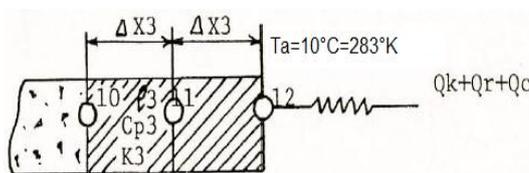


Figura 11: Sección de Pared que Incluye el Punto Exterior 12. (Holman J. , 1999)

El balance térmico en el punto exterior de pared, se calcula con la siguiente ecuación **(2. 22)**:

$$\begin{aligned}
 T_{12}(t + \Delta t) &= \frac{2}{M} * T_{11}(t) \\
 &+ T_{12}(t) \\
 &* \left(1 - \frac{2}{M} * h \right. \\
 &* \frac{\Delta X_3}{K_3} \left. \right) + \frac{2}{M} \\
 &* h * \frac{\Delta X_3}{K_3}
 \end{aligned} \tag{2. 21}$$

Balance Térmico para el Punto Exterior de Pared

Dónde:

h = Coeficiente de transferencia de calor que considera la convección hacia el medio circundante (Holman J., 1999),

Anexo: B.

$$h = 5 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2\text{°C}} \text{ ó } 25 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

8.7. ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE TRATAMIENTO DEL MATERIAL.

El balance energético cuya resolución llevará a predecir el cálculo del tiempo de calentamiento del material, se ha planteado de la siguiente manera:

La energía radiante precedente de las paredes interiores de la cámara del horno que llega a la carga, provocará un cambio de energía interna, en la misma que se verá reflejada en el aumento de su temperatura.

El balance energético quedará establecido así: ecuación (2. 28). (Holman J. , 1999).

$$Q_{pc} = Q_c \quad (2.22)$$

La energía radiante procedente de la pared hacia la carga, es igual al calor absorbido por la carga como lo indica la ecuación (2.29):

$$\begin{aligned} \tau * A_p * F_p - c(T_p^4 - T^4) \\ = mc * C_{pc} * \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (2. 23)$$

Resolviendo la ecuación diferencial e integrando la expresión tendremos la ecuación (2. 30):

$$\begin{aligned} t = \frac{1}{4K_1^{1/4} * K_2^{1/4}} * \left[\ln \left(1 + \frac{T}{T_p} \right) - \ln \left(1 - \frac{T}{T_p} \right) + \frac{2\pi}{180} * \right. \\ \left. \text{tg}^{-1} \left(\frac{T}{T_p} \right) \right]_{T_0}^{T_f} \end{aligned} \quad (2. 24)$$

Dónde:

τ = Constante universal 4.965×10^{-8} [Kcal/(h*m²*°K)]

mc = Masa de la carga = 143.52 kg = 315.744 lb

Cpc = Calor específico de la carga = 1800 J/(Kg°K)

To = Temperatura inicial de la carga = 10°C = 283 °K

Tf = Temperatura final de la carga = 80°C = 353 °K

T = Temperatura de la carga (variable con el tiempo).

8.8. ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE CONVECCIÓN.

El rendimiento de convección de un sistema de calefacción viene determinado por la relación entre el calor absorbido por el material, es decir la carga, para una determinada elevación de temperatura y el correspondiente calor suministrado por el sistema.

El rendimiento térmico por conversión se puede calcular con la siguiente ecuación (2. 31): (Holman J. , 1999).

$$N_{tc} = \frac{Q_{carga\ total}}{Q_s} * 100 \quad (2.25)$$

9. ANÁLISIS DEL SISTEMA.

El sistema de calentamiento por medio de resistencias eléctricas, está encaminado a disminuir accidentes laborales y nos permite tener un mayor control de la temperatura en el interior del horno, en comparación de los hornos a gas.

Este sistema trata de un Horno Estacionario con el empleo de resistencias eléctricas, cuyo objetivo principal es calentar los tanques de Prepolymer a una temperatura de 80°C por un tiempo estimado de 24 hrs, (temperatura y tiempo establecidos por los fabricantes de Prepolymer y Polyol). (ELAchem Srl, 2009).

El sistema debe mantener una temperatura casi constante en el interior del horno, aproximadamente con una variación de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

La selección de los métodos, teorías e información estará de acuerdo a los criterios y conocimientos alcanzados durante la carrera de ingeniería. Se tomarán los parámetros que sean necesarios para realizar los cálculos que estén directamente relacionados con los datos.

9.1. Capacidad de carga.

Dada las necesidades de la empresa se tomará como dato para los respectivos cálculos una capacidad de carga de 143.52 Kg, que corresponde al peso del tanque del Prepolymer, sabiendo que la producción es continua durante los cinco días laborables de la semana.

Esta capacidad de carga puede ser variable, pero no superior a la capacidad de carga dada.

9.2. Diseño térmico del sistema.

9.2.1. Consideraciones Generales.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción.

Se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.

Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.

La ley de Fourier de la conducción del calor afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

9.2.2. Transferencia de Calor.

Transferencia de calor es el intercambio de energía en forma de calor entre dos cuerpos a distintas temperaturas, el calor se transfiere mediante convección, radiación y conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

9.2.3. Análisis de las Temperaturas en el Horno.

Para el análisis de temperaturas en las paredes del horno, se considera un estado estable, como se puede apreciar existe un fluido caliente y uno frío, lógicamente el primero circula en el interior y el segundo en el exterior del horno, respectivamente ver la **figura 12**.

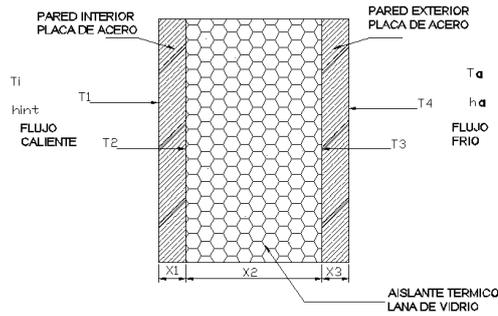


Figura 12: Temperaturas en las paredes del horno. (Aguirre/Sánchez, Diseño en AutoCAD 2012)

Dónde:

T_{int} : Temperatura en el interior del horno.

h_{int} : Coeficiente de Transferencia de Calor interno.

T_{α} : Temperatura del medio ambiente.

h_{α} : Coeficiente de Transferencia de Calor por el ambiente.

T_1 : Temperatura de contacto entre la cara interior de la placa interior y el fluido caliente.

T_2 : Temperatura de contacto entre la cara exterior de la placa interior y el aislante térmico.

T_3 : Temperatura de contacto entre la cara interior de la placa exterior y el aislante térmico.

T_4 : Temperatura de contacto entre la cara exterior de la placa exterior y el ambiente, está en algunos cálculos futuros puede ser mencionada como TP o TS.

X_1 : Espesor de la placa de acero interna.

X_2 : Espesor del aislante térmico.

X_3 : Espesor de la placa de acero externa.

A : Área lateral de la pared del horno.

9.2.4. Analogía eléctrica.

En la siguiente **figura 13**, podemos encontrar el análisis de temperaturas en las paredes del horno, desde la parte

interior del horno hacia la parte exterior, por medio de esta analogía eléctrica podemos facilitar algunos cálculos, tal como se muestra:

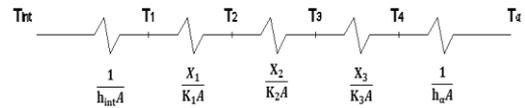


Figura 13: Analogía eléctrica de la pared del horno. (Holman J., 1999).

En resumen, el flujo de calor se puede representar de diferentes maneras como se muestra en la ecuación **(2. 32)**.

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_{int} - T_{\alpha}}{R_T} \quad (2.26)$$

9.3. ANÁLISIS TÉRMICO DEL HORNO MEDIANTE EL SOFTWARE “ANSYS R15.0”.

Mediante el programa ANSYS R15.0, demostraremos la distribución uniforme de calor dentro del horno eléctrico, determinando los puntos más calientes del horno y también el factor de diseño térmico.

Para poder simular los calores del horno en el programa, se realizó la estructura del horno en INVENTOR 2014. En las siguientes figuras y tablas, se mostrara y explicara los resultados del modelamiento del horno.

La **figura 14**, muestra en 3D la disposición de los elementos internos que conforma el horno e incluido la carga, para realizar este

procedimiento se tomó en cuenta los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura de diseño.
- Peso de la carga.

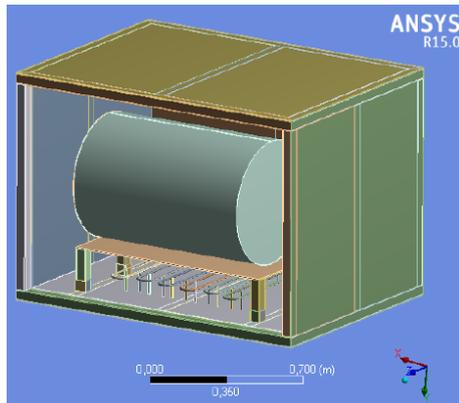


Figura 14: Análisis térmico del horno realizado en ANSYS R15.0.
(Aguirre/Sánchez.)

En la siguiente **figura 15**, se muestra la temperatura de trabajo, la cual indica que va a ser constante en todo el proceso de la simulación.



Figura 15: Curva transitoria térmica.
(Aguirre/Sánchez.)

La siguiente **figura 16**, muestra el decremento de temperatura que existe al realizar la simulación, hasta llegar a establecerse a una temperatura estable.

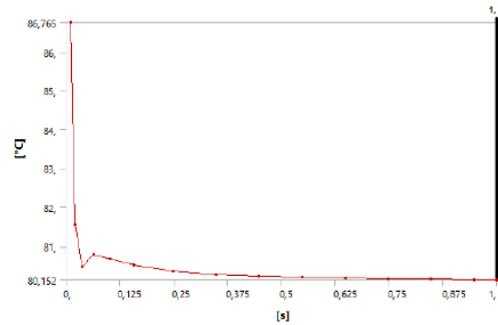


Figura 16: Curva temperatura global máxima. (Aguirre/Sánchez.)

La **figura 17** y la **tabla 1**, indica como el flujo de calor desde un valor $6,2159e+6$ se distribuye por todo el espacio de la cámara de calentamiento, hasta llegar a calentar todo el espacio vacío e incluso el material que se va a calentar.

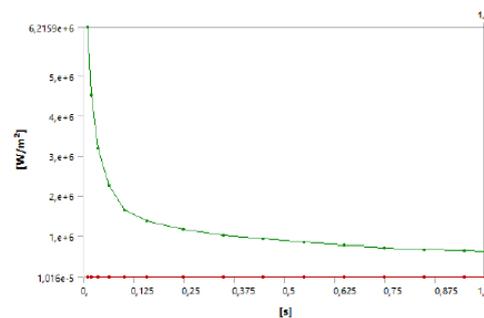


Figura 17: Curva del flujo de calor total. (Aguirre/Sánchez.)

Time [s]	Minimum [W/m ²]	Maximum [W/m ²]
1,e-002	1,016e-005	6,2159e+006
2,e-002	1,297e-005	4,5264e+006
3,6644e-002	1,1916e-005	3,1874e+006
6,2925e-002	1,4762e-005	2,2581e+006
0,10074	1,8047e-005	1,6548e+006
0,1562	5,0632e-005	1,3659e+006
0,24792	6,469e-005	1,1625e+006
0,34792	2,3236e-005	1,022e+006
0,44792	2,4104e-005	9,2071e+005
0,54792	5,9888e-005	8,4278e+005
0,64792	2,9299e-005	7,8047e+005
0,74792	1,6433e-005	7,293e+005
0,84792	7,8766e-005	6,864e+005
0,94792	4,0679e-005	6,4979e+005
1,	6,6105e-005	6,322e+005

Tabla 1: Datos del Flujo de calor total.
(Aguirre/Sánchez.)

La **figura 18**, indica como el flujo total de calor envuelve el material en sus tres ejes X, Y y Z.

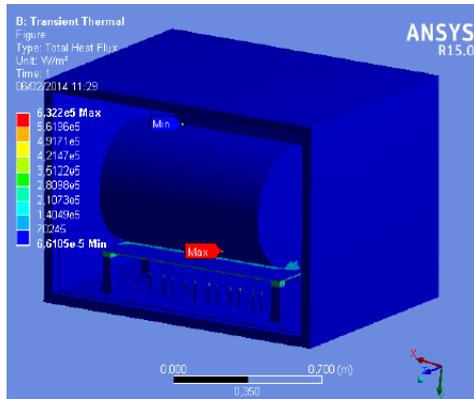


Figura 18: Flujo total de calor interno del horno. (Aguirre/Sánchez.)

A continuación en la **figura 19** y **tabla 2**, se observa cómo trabaja la curva de flujo de calor y temperatura en la direccional Y.

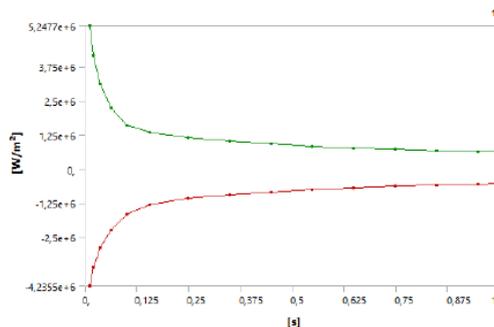


Figura 19: Curva de la direccional del flujo de calor. (Aguirre/Sánchez.)

Tabla 2: Direccional del flujo de calor. (Aguirre/Sánchez.)

Time [s]	Minimum [W/m ²]	Maximum [W/m ²]
1,e-002	-4,2355e+006	5,2477e+006
2,e-002	-3,5691e+006	4,1492e+006
3,6644e-002	-2,8952e+006	3,1105e+006
6,2925e-002	-2,2237e+006	2,2395e+006
0,10074	-1,6446e+006	1,5921e+006
0,1562	-1,2905e+006	1,3577e+006
0,24792	-1,0811e+006	1,1554e+006
0,34792	-9,4105e+005	1,0157e+006
0,44792	-8,3304e+005	9,1506e+005
0,54792	-7,4382e+005	8,376e+005
0,64792	-6,739e+005	7,7567e+005
0,74792	-6,2343e+005	7,2481e+005
0,84792	-5,8073e+005	6,8217e+005
0,94792	-5,434e+005	6,4579e+005
1,	-5,2515e+005	6,2831e+005

En la **figura 20**, se observa como la direccional de flujo de calor en Y, es la que mayor valor tiene con respecto a los ejes X y Z, esto se debe a la disposición de las resistencias en el interior del horno.

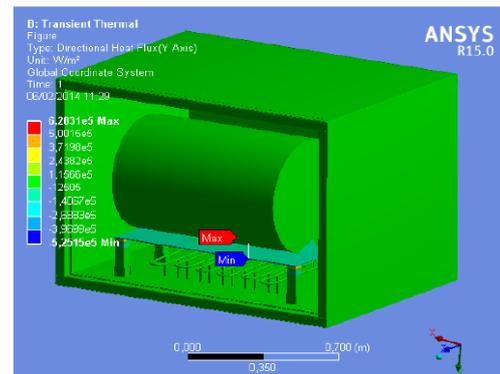


Figura 20: Estado Estacionario térmico. (Aguirre/Sánchez.)

En la **figura 21**, se observa el análisis estático estructural, que indica la resistencia que tiene el material utilizado en la construcción del horno frente a una carga bajo temperatura de trabajo, por lo tanto como el valor de factor de seguridad es >1, esto significa que el diseño y elección de los materiales son los correctos.

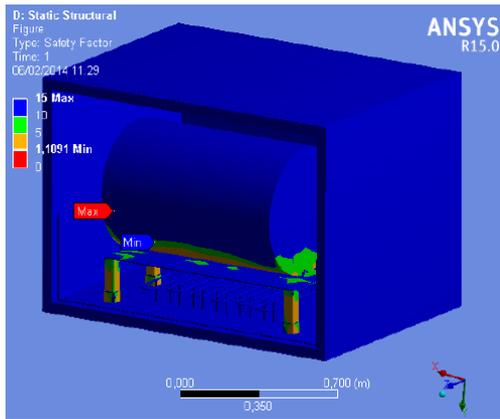


Figura 21: Factor de seguridad.
(Aguirre/Sánchez.)

Dimensiones definitivas de la cámara de calentamiento.

Como ya se definió anteriormente las dimensiones de la cámara de calentamiento, esta tendrá las siguientes dimensiones como lo indica la **figura 22**.

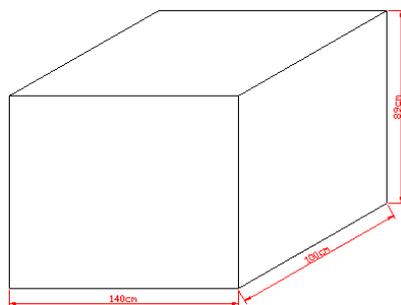


Figura 22: Dimensiones de la cámara de calentamiento del horno.

(Aguirre/Sánchez, Diseño en AutoCAD 2012).

Alto: 98cm = 0.98 m.

Ancho: 140cm = 1.40 m.

Profundidad: 100cm = 1 m.

Volúmen=1.40 m x 0.98 m x 1 m.

Volúmen=1.372 m³

9.4. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL HORNO.

La elección del material se realizó de acuerdo a las siguientes características las cuales son: estructura sólida y ligera, bajo costo del material y su fácil obtención en el mercado local, y que no se requiere de trabajos especiales, ni máquinas especiales para trabajarlo.

En el desarrollo de la construcción mecánica del horno, se debe tener en cuenta los conocimientos técnicos en la utilización de máquinas herramientas, la selección correcta del equipo de soldadura y la planificación adecuada para el proceso de construcción, ver la **figura 22**.



Figura 22: Horno eléctrico.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

10.1. CONCLUSIONES.

- El horno de resistencias eléctricas, es diseñado y construido de tal forma que existe el 92% de ganancia de calor.

- El calor del horno se distribuye homogéneamente gracias a que las resistencias fueron ubicadas de manera que se aproveche al máximo la potencia que entregan.
- El calor que se transmite hacia las paredes externas del horno es mínima, debido a que el diseño de las dimensiones de las paredes del aislamiento nos permiten tener una temperatura de 30°C, con lo que se evita que los operarios sufran quemaduras.
- Con la simulación realizada del diseño horno en "ANSYS R15.0", se puede concluir que el diseño tendrá un factor de seguridad del 1.1, con lo que se puede concluir que la estructura del horno soportara la temperatura para la que fue diseñado sin sufrir daños.
- En el análisis estructural que se realizó en el software "COMSOL" se determinó que la estructura de la mesa podría soportar hasta 7,62 veces el peso del tanque, con lo que no existiría peligro que la estructura colapse.
- De igual manera se realizó el análisis de la estructural del esqueleto del horno, en el cual nos dio que la estructura soportará 4,77 veces la carga a la que fue diseñada.
- Para una mejor lectura de temperatura del horno, se dispuso a la termocupla en la parte superior media del horno, ya que por sus dimensiones el calor en su totalidad sube, y de esta forma esta nos dará una mejor lectura de la temperatura interna del horno.
- En las pruebas que se realizó a partir de un control "ON-OFF", con una histéresis de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, con el que se tomaron datos cada minuto de la temperatura interna del horno, permitiendo obtener un registro el cual nos permitió dibujar la curva de control del horno, para el proceso de calentamiento requerido es satisfactoria.
- La cantidad total con la que fue construido el horno fue de \$2269.06 (dólares americanos), que serán recuperados en 7 meses, eso tomando en cuenta la producción de plantillas. Dadas estas cifras se ha hecho un gran ahorro ya que un horno en el mercado un horno de las mismas características cuesta \$7500 dólares americanos.
- Anteriormente se adquirirían 2000 plantillas a \$3 c/u, con la puesta en marcha de este horno la producción de plantillas de buena calidad será de 2500 plantillas, con lo que se mejoraría la producción y calidad de zapatos.

1.2. RECOMENDACIONES.

- Antes de cualquier operación del horno tomar en cuenta el manual de operación y mantenimiento, para evitar daños tanto personales como de la máquina, todo esto va documentado en el Anexo: S.

- Para realizar el mantenimiento de la lana de vidrio, se debe usar equipo de protección personal (EPP), y se lo deberá realizar cada año para evitar que el horno pierda sus propiedades térmicas aislantes.
- El controlador deberá ser manipulado por una persona autorizada, ya que una manipulación incorrecta podría afectar seriamente la producción y producir daños a los equipos
- Para obtener resultados óptimos en el diseño térmico y estructural del horno, es recomendable realizar simulación de los prototipos en software tales como "ANSYS", que son de gran ayuda en la construcción de máquinas térmicas o de cualquier tipo.
- Es recomendado antes de realizar cualquier proyecto un estudio de factibilidad, para determinar si es viable seguir con el proyecto y que impacto ambiental producirá en el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA.

- Antonio Creus, S. (2011). *Instrumentacion Industrial*. 8^{va} Ed. Mexico: Alfaomega S.A.
- Astigarraga Urquiza, J. (1994). *Hornos Industriales de Resistencias*. Madrid: McGraw-Hill.
- Baca Urbina, G. (2003). *Fundamentos de Ingenieria Economica*. Mexico: D.F:McGraw-Hill.
- BOBROW, L. S. (1993). *Analisis de circuitos Electricos*. Mexico: Mc Graw Hill Interamericana.
- YUNUS A. CENGEL / AFSHIN J. GHAJAR. (2011). *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* 4^{ta} Ed. Mexico: McGRAW-HILL/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Enriquez Harper, G. (2003). *Guia para el Diseño de Instalaciones Electricas Residenciales, Industriales y Comerciales*. Mexico: D.F: Limusa.
- Gibbons, I. R. (2007). *Electronica de Potencia*. En *Control de Temperatura*. Argentina.
- J. P. Holman, (1999). *Transferencia de Calor*. 8^a Ed. Mexico: D.F: Continental.
- Marquez, A. L. (2001). *Instalaciones Electricas de baja tension Comerciales e Industriales*, 5^{ta} Ed. España: Paraninfo S.A.
- Mills, A. F. (1997). *Transferencia de Calor*. Mexico: Addison_Wesly Iberoamericana, S.A.
- Mott, R. L. (1998). *Diseño de Elementos de Maquinas*, 4da Edicion. Mexico: Englewood Cliffs.
- Ochoa Setzer, G. A. (2002). *Administarcion Financiera*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.

BIIBLIOGRAFÍA.



**Patricio Geovanny
Aguirre Gonzaga.**

Nació en Lago
Aguirre, soltero,
estudios
secundarios Colegio Técnico
Pacífico Cembranos, egresado de
Ingeniería electromecánica,
Universidad de las Fuerzas
armadas – **ESPE**.



**Boris Alexander
Sánchez Andrade.**

Nació en Santo
Domingo, soltero,
estudios
secundarios Colegio
Técnico Pacífico Cembranos,
egresado de Ingeniería
electromecánica, Universidad de
las Fuerzas armadas – **ESPE**.