

1-1-2016

## Construcción de un horno con control de temperatura para moldeo plástico

John Fredy Martínez Jiménez  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_automatizacion](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion)

---

### Citación recomendada

Martínez Jiménez, J. F., & . (2016). Construcción de un horno con control de temperatura para moldeo plástico. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_automatizacion/108](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/108)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería en Automatización by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UN HORNO CON CONTROL DE TEMPERATURA  
PARA MOLDEO PLASTICO.

JOHN FREDY MARTÍNEZ JIMÉNEZ

Universidad de la Salle

Facultad de Ingeniería en Automatización

Bogotá D.C

2016

CONSTRUCCION DE UN HORNO CON CONTROL DE TEMPERATURA PARA  
MOLDEO PLÁSTICO

JOHN FREDY MARTÍNEZ JIMÉNEZ

Proyecto de grado

Proyecto para optar al título de Ingeniero de  
Automatización

Director de tesis  
Ingeniero Electrónico  
Jorge Eliecer Rangel Díaz  
PHD. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
Facultad de Ingeniería en Automatización  
Bogotá D.C  
2016

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma Presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## DEDICATORIAS

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al ingeniero Jorge Rangel por la Asesoría, apoyo y orientación en la realización del presente trabajo de grado.

¿Cuál es el máximo tamaño de lámina a procesar?

El tamaño máximo de la lámina a procesar es de 1,10m de largo por 70cm de ancho por un espesor de 3,18 mm estaba en 0,038m

¿Cuál es el material a procesar?

El material elegido para procesar con el horno es polietileno de alta densidad y se escogió porque para la realización de los procesos de fabricación de prótesis y elementos de tipo ortopédico puede ser muy viable ya que tiene las siguientes características:

1. Excelente resistencia térmica y química.
2. Muy buena resistencia al impacto.
3. Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
4. Muy buenas características de producción es decir, se puede procesar por los métodos de conformados empleados para los termoplásticos, como inyección y extrusión.
5. Es flexible, aún a bajas temperaturas.
6. Es muy ligero.

¿Productividad del proceso?

La productividad del proceso está dada por la capacidad del horno de calentar las láminas a una temperatura de 230 ° promedio en aproximadamente 4 minutos y medio que representaría una producción diaria de 48 piezas diarias pero si a esta cifra le restamos el tiempo que el operario gastara en ingresar y retirar las piezas, además del tiempo de montaje de la misma en el molde de acondicionamiento previamente realizado se llegaría a una producción de 12 elementos ortopédicos por día máximo que realizando el comparativo con el dato de 4 piezas realizadas con el sistema anterior nos daría un aumento de productividad del 300%.

Criterios de diseño del horno para calentamiento de láminas de polietileno de alta densidad

- Diseñar un horno que sea capaz de alcanzar la temperatura de 230°C la cual es necesaria para que se produzcan las reacciones térmicas necesarias para calentar las láminas necesarias para el proceso.
- Diseñar un horno que partiendo de la composición de los materiales con los que se fabrica minimice al máximo la pérdida de calor y temperatura en su interior.

- Diseñar un horno que facilite la manipulación de entrada y de salida de las láminas a calentarse.
- Diseñar un horno que sea más eficiente energéticamente hablando y que permita elevar la producción de piezas necesarias para hacer viable este proceso
- Crear un sistema que permita tomar como ejemplo para potencializar este tipo de aplicaciones en la industria.

#### Consumo de gas natural

Para la potencia calorífica máxima requerida del horno, el consumo de gas del quemador será el siguiente:

Para determinar el consumo de gas utilizamos la ecuación 4.1.

Donde:

G= Consumo de gas (Nm<sup>3</sup>/h)

P= Potencia calorífica (kcal/h)

P= Poder calorífico del gas (kcal/m<sup>3</sup>)

$$G = \frac{P}{P_c} \quad (4.1)$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación (4.1) expresión anterior, tenemos que el consumo de gas arroja un valor representado en la ecuación 4.2 y 4.2a

$$G = \frac{128976.8 \text{ Kcal.h}}{8500 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Kcal}} \quad (4.2)$$

$$G = 15,173 \frac{\text{Nm}^3}{h} \quad (4.2A)$$



### 3.10 MODELAMIENTO Y CONTROL DEL SISTEMA TERMICO

Los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia de calor de una sustancia a otra. Estos sistemas se analizan en términos de resistencia y capacitancia, aunque la capacitancia térmica y la resistencia térmica tal vez no se representen con precisión como elementos de parámetros concentrados, dado que, por lo general, están distribuidas en todas las sustancias. Para lograr análisis precisos, deben usarse modelos de parámetros distribuidos.

Sin embargo, para simplificar el análisis, aquí supondremos que un sistema térmico se representa mediante un modelo de parámetros concentrados, que las sustancias que se caracterizan mediante una resistencia al flujo de calor tienen una capacitancia térmica insignificante y que las sustancias que se caracterizan por una capacitancia térmica tienen una resistencia insignificante al flujo de calor.

El calor fluye de una sustancia a otra de tres formas diferentes: por conducción, por convección y por radiación. Aquí sólo consideraremos la conducción y la convección. (La transferencia de calor por radiación sólo se aprecia si la temperatura del emisor es muy alta en comparación con la del receptor. La mayor parte de los procesos térmicos en los sistemas de control de procesos no involucran transferencia de calor por radiación.)

(Rodríguez Avila, 1997, págs. 22-25)

Para que haya una perfecta combustión del gas propano se necesitan las siguientes cantidades de componentes como lo muestra la tabla 18

metano	Oxigeno	Aire
1,2 <sup>^3</sup>	5m <sup>^3</sup>	23,9m <sup>^3</sup>
1,2kg	2,55m <sup>^3</sup>	12,15m <sup>^3</sup>
1,2kg	3,64kg	15,7m <sup>^3</sup>

Tabla18. Cantidad de gas necesario para realizar combustión

Los datos esenciales para poder desarrollar el modelamiento térmico del sistema se relacionan a continuación:

T1 = Temperatura de la carga  
T2 = Temperatura ambiente  
T3 = Temperatura de las resistencias  
T4 = Temperatura de la pared interior  
Q1= Calor generado por las resistencias =  $I^2/R$   
Q2 = Flujo de calor desde las paredes hacia la carga  
Q3=Perdidas de calor a través de las paredes del horno  
C1= Capacidad térmica de la carga  
C2= Capacidad térmica de elementos de calentamiento  
C3= Capacidad térmica de las paredes del horno  
Rt1= Resistencia térmica entre paredes y la carga  
Rt2= Resistencia térmica entre paredes y exteriores

Falta dibujo del modelamiento térmico para análisis.v

### **Materiales a utilizar para la construcción del horno**

Pared Compuesta: Acero Inox + Pared Diatérmica +Acero Inox.

Acero Inox: L: 0.0343 mm Conductividad térmica de  $K= 53.34 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

Material diatérmico: L: 0.035 m. Conductividad térmica:  $K=0.12 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

El material diatérmico a usarse será lana de vidrio porque es un material aislante térmico y acústico sumamente eficiente y de fácil manejo. El material posee una muy buena relación resistencia térmica y el precio, siendo un material muy apropiado para aislaciones térmicas a un costo moderado y con una pérdida de temperatura muy baja

Temperatura máxima de trabajo: 230°C

Este horno está diseñado para condiciones de estado estacionario, además de que los materiales poseen características de conductividad térmica constante, para este cálculo se desprecian las pérdidas en aristas y bordes y el flujo de calor es unidimensional en cada pared. Las dimensiones tomadas en cuenta para este caso corresponden al tamaño de las láminas y de acuerdo a las especificaciones internas y externas de diseño del horno así como su espesor corresponde a la disipación térmica que requiere cada capa del horno.

Frontal - Posterior: posee una ventana para visualización del material de las siguientes dimensiones y área: 0.18m x 0.34m, y un área de 0.0612m, entonces para el cálculo térmico se toma el área total menos el área de la ventana de entrada que es la misma de salida, aunque para extracciones de material se diseñó una puerta más pequeña para evitar así la pérdida masiva de calor.

Por lo tanto

$$Q_1 - (Q_2 + Q_3) = \frac{c_2 dT_3}{dt} \quad (3.18)$$

Considerando la conductividad térmica de la carga:

$$Q_2 = (T_4 - T_1)/R_{t1} = C_1 dT_1/dt \quad (3.19)$$

El flujo de calor a través de las paredes hacia el ambiente es:

$$Q_3 = T_3 - T_2/R_{t2} \quad (3.20)$$

Si la conductividad térmica de la pared es elevada:

$$(Q_3) = \frac{c_3 dT_4}{dt} \quad (3.21)$$

Sustituyendo (3.21) y (3.19) en (3.18), se obtiene:

$$\frac{U^2}{R} - \frac{c_1 dT_1}{dt} - \frac{c_3 dT_4}{dt} = \frac{c_3 dT_3}{dt} \quad (3.22)$$

Aproximando T3 y T4:

$$\frac{U^2}{R} - \frac{c_1 dT_1}{dt} - \frac{(c_2 + c_3) dT_4}{dt} \quad (3.23)$$

De (3.19) se deduce

$$T_4 = C_1 R_{t1} \frac{dT_1}{dt} + T_1 \quad (3.24)$$

Sustituyendo (3.23) en (3.22) se da:

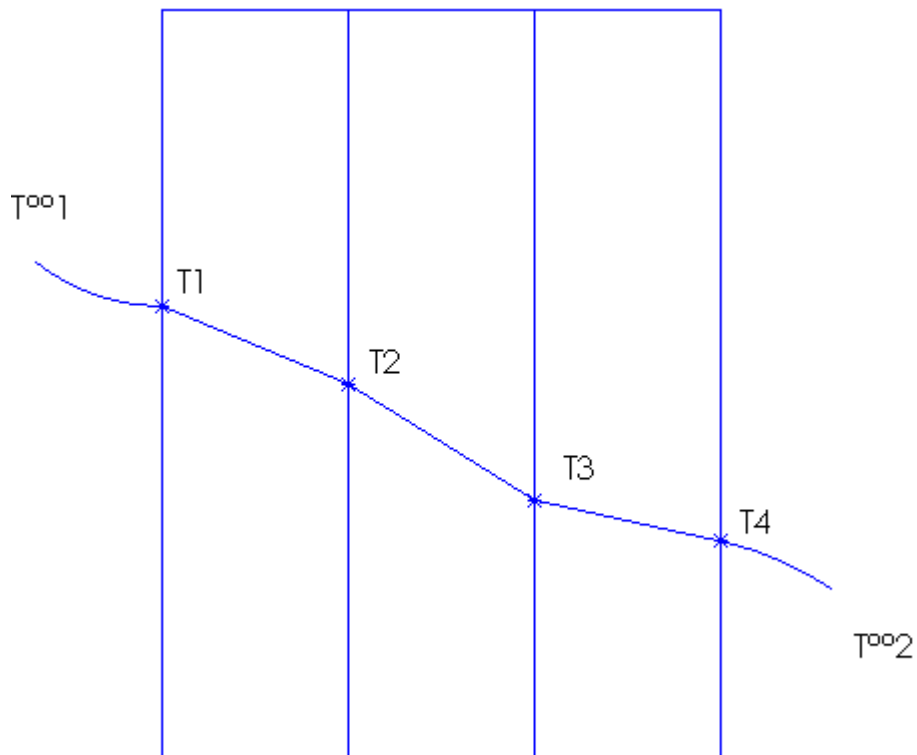
$$\frac{U^2}{R} - \frac{c_1 dT_1}{dt} - \frac{(c_2 + c_3) d}{dt} \left[ C_1 R_{t1} \frac{dT_1}{dt} + T_1 \right] \quad (3.25)$$

Eliminando las constantes de tiempo, reemplaza y simplifica en (3.25)

$$T \frac{d^2 T_1}{dt^2} + \frac{(C_1 + C_2 + C_3) dT_1}{(C_2 + C_3) dt} = \frac{U^2}{R} \frac{1}{(C_2 + C_3)} \quad (3.26)$$

Para resolver (3.26) El horno para realizar el calentamiento de las láminas estará determinado a una temperatura de máximo 230 °C y temperatura ambiente de 20 °C

Razón de la conducción:



$$Q_{cond} = \frac{K * A * T^{\circ\circ 1} - T^{\circ\circ 2}}{L}$$

$$Q_{cond} = \frac{53,46 * 0,585m^2 * 230^{\circ}C - 20^{\circ}C}{0,08636m}$$

$$Q_{cond} = \frac{6567,561}{0,08636} = 76,04 \text{ Kw}$$

Resistencia Metálica Capa Metálica 1 y 2

$$R_{pared1} = \frac{0.00318 \text{ m}}{53,34 * 0,585\text{m}^2}$$

$$R_{pared1} = \frac{0.005\text{m}}{31,2039} = 0.00016 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Resistencia para aislamiento 2

$$R_{pared2} = \frac{0.04\text{m}}{0,12 * 0,585\text{m}^2}$$

$$R_{pared2} = \frac{0.04\text{m}}{0.0702}$$

$$R_{pared2} = 0.569^\circ\text{C/W}$$

Razón de Convección 1

$$R_{conv1} = \frac{0,98}{2,44 * 0,585\text{m}^2}$$

$$R_{conv1} = \frac{0,98}{14,1}$$

$$R_{conv1} = 0,0714^\circ\text{C/W}$$

### Resistencia térmica Total

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 * Area} + \frac{L_1}{K_1 * Area} + \frac{1}{h_2 * Area_2} + \frac{L_2}{K_2 * Area} + \frac{1}{h_3 * Area} + \frac{L_3}{K_3 * Area} + \frac{1}{h_4 * Area} + \frac{L_4}{K_4 * Area}$$

$$R_{total} = 0,0714 + \frac{0,00318}{53,34 * 0,585m^2} + \frac{0,04m}{0,12 * 0,585m^2} + \frac{0,00318}{53,34 * 0,585m^2} + 0,0714$$

$$R_{total} = 0,0714 + 0,0001 + 0,0702 + 0,0001 + 0,0714 + 0,0702 + 0,0001 + 0,0714$$

$$R_{total} = 0,2935^{\circ}C/W$$

### Razón de Transferencia

$$Q' = \frac{T^{\circ}1 - T^{\circ}2}{R_{total}}$$

$$Q' = \frac{230^{\circ}C - 20^{\circ}C}{0,2935^{\circ}C/W}$$

$$Q' = \frac{210}{0,2935}$$

$$Q' = 715,5 W$$

Para hallar T1

$$Q' = \frac{T^{\circ}1 - T1}{RConv1}$$

$$T1 = T^{\circ}1 - Q' * Rconv1$$

$$T1 = 230^{\circ}C - 715,5 * 0,07$$

$$T1 = 230^{\circ}C - 50,08^{\circ}C$$

$$T1 = 179,92^{\circ}C$$

Para hallar T2:

$$Q' = \frac{T^{\circ}1 - T2}{RConv1 + Rpared1}$$

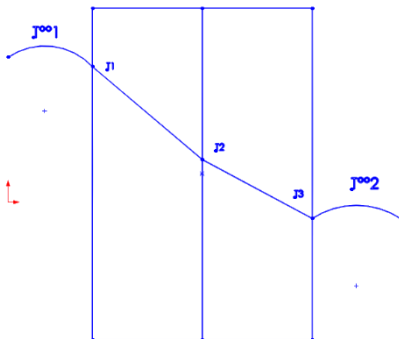
$$T2 = T^{\circ}1 - Q' * Rconv1 + Rpared1$$

$$T2 = 230^{\circ}C - 715,5 * 0,07 + 0,00016$$

$$T2 = 230^{\circ}C - 50,085^{\circ}C$$

$$T2 = 179,915^{\circ}C$$

Para hallar T3:



$$Q' = \frac{T2 - T3}{RConv2 + Rpared2}$$

$$T3 = T2 + Q' * Rconv2 + Rpared2$$

$$T3 = 161,05^{\circ}C + 715,5 * 0,07 + 0,569$$

$$T3 = 161,05 + 1,2585^{\circ}C$$

$$T3 = 162,3085^{\circ}\text{C}$$

Para hallar T4:

$$Q' = \frac{T4 - T^{\circ}2}{R_{Conv2}}$$

$$T4 = T^{\circ}2 + Q' * R_{conv2}$$

$$T4 = 30^{\circ}\text{C} + 175,5 * 0,07$$

$$T4 = 30^{\circ}\text{C} + 1,2585^{\circ}\text{C}$$

$$T4 = 42,285^{\circ}\text{C}$$

Caída de Temperatura Capa 1:

$$\Delta T = Q' * R \quad (1)$$

Reemplazado Q' y R en (1):

$$\Delta T = \frac{L}{K * Area} * \frac{T^{\circ}1 - T^{\circ}2}{R_{total}}$$

Entonces:

$$\Delta T = \frac{0,04\text{m}}{53,34 * 0,585\text{m}^2} * \frac{230^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{0,2132^{\circ}\text{C}/\text{W}}$$

$$\Delta T = \frac{0,04\text{m}}{53,34 * 0,585\text{m}^2} * \frac{210^{\circ}\text{C}}{0,2132^{\circ}\text{C}/\text{W}}$$



$$\Delta T = 0.0012 * 985W$$

$$\Delta T = 1,1^{\circ}C$$

Caída de Temperatura Capa 2 (Aislante Térmico):

$$\Delta T = Q' * R \quad (1)$$

Reemplazado Q' y R en (1):

$$\Delta T = \frac{L}{K * Area} * \frac{T^{\circ}1 - T^{\circ}2}{Rtotal}$$

Entonces:

$$\Delta T = \frac{0,005}{0,12 * 0,585m^2} * \frac{230^{\circ}C - 30^{\circ}C}{1,4586^{\circ}C/W}$$

$$\Delta T = \frac{0,005}{0,12 * 0,585m^2} * \frac{200^{\circ}C}{1,4586^{\circ}C/W}$$

$$\Delta T = 0.07122 * 137,11W$$

$$\Delta T = 9,76^{\circ}C$$

Pérdida de Calor a través de Pared 1:

$$Q' = K * Area * \frac{T1 - T2}{L}$$

$$Q'p = 53,34 * 0,585m^2 * \frac{179,92^{\circ}C - 179,91^{\circ}C}{0,005m}$$

$$Q'p = 31,2039 * 2$$

$$Q'p = 62,4078 W$$

Pérdida de Calor a través de Pared 2:

$$Q' = K * Area * \frac{T2 - T3}{L}$$

$$Q'p = 0,12 * 0,585m^2 * \frac{179,91^{\circ}C - 162,3085^{\circ}C}{0,04m}$$

$$Q'p = 0,0702 * 440$$

$$Q'p = 30,89W$$

Pérdida Total de Calor a través de las Paredes

$$PT = (30,89W * 10) + (62,4078 * 5)$$

$$PT = (308,9) + (312,039)$$

$$PT = 620,939 W$$

$$PT = 0,620939 KW$$

Perdida de temperatura en las paredes del horno

$$Ptemp = (9,76^{\circ}C * 5) + (1,1 * 10)$$

$$Ptemp = (48,8) + (11)$$

$$Ptemp = 59,92^{\circ}C$$

El calor Total necesario para calentar la Carga y elementos internos es determinado por la siguiente formula

$$Qs = Qp + Qcargatotal$$

Que representa la sumatoria de las pérdidas a través de los materiales, de las pérdidas de temperatura, las pérdidas por calor de conducción, por lo cual nos da la sumatoria de los valores calculados anteriormente:

$$Qs = 715 + 62,4078 + 30,89 + 0,620939 + 620,939$$

$$Qs = 1,428kw$$

El rendimiento térmico del horno se halla con la ecuación # 10 la cual permite evaluar la eficiencia del proceso.

$$NTC = \frac{Qcargatotal}{QS} * 100\%$$

Donde:

Ntc = Rendimiento térmico

Qs= calor requerido por ciclo

Entonces:

$$NTC = \frac{715}{1428} * 100\%$$

$$NTC = 52\%$$

Calculo del volumen máximo del horno y potencia requerida:

$$Vol = 0,585 * 1.13 * 1.18(m^3)$$

$$Vol = 0,78(m^3)$$

$$Vol = 0,78(m^3)$$

$$P = 0,78 m^3 * 14,28 \frac{Kw}{m^3}$$

$$P = 11,11384Kw$$

La potencia a usarse será:  $P = 1,11384Kw$

Calculo de Potencia de un quemador para tratamiento térmico

$$P = Ps * Cps * \frac{TF - TI}{Tiempo * E}$$

Para hallar la potencia requerida por cada quemador tomamos en cuenta la ecuación # 5.1 donde

- Peso de la sustancia a calentar en Kg. (Ps)
- Calor específico de la sustancia a calentar en

- Kcal.../Kg. (Cps)
- Temperatura inicial en °C (Ti)
- Temperatura de tratamiento en °C (Tf)
- Tiempo en calentar la sustancia en horas (Tiempo)
- Eficiencia horno de tratamiento en % (E)

Entonces

$$P = Ps * Cps * \frac{TF - TI}{Tiempo * E}$$

$$P = 1,2 * 0,28 * \frac{230^{\circ} - 18^{\circ}}{0,075 * 75\%}$$

$$P = \frac{71,232}{0,075 * 0,75}$$

$$P = \frac{71,232}{0,05625}$$

$$P = \frac{71,232}{0,05625}$$

Por lo tanto la potencia calculada para cada uno de los quemadores es:

$$P = 1,27Kw$$

Ahora se procede a calcular el consumo de combustible requerido por cada quemador a partir de la ecuación # 5.2

Donde:

P= Potencia quemador en Kcal.../h

PCI =Poder calorífico del combustible en Kcal.../Kg.

Por lo tanto:

$$CC = P/PCI$$

$$CC = \frac{1092,0095}{9,032}$$

$$CC = 120 \text{ Kg/h}$$

Para Calcular el aire necesario consumido se observa la tabla # 4

Combustible	5%	10%	15%	20%	25%
GN	18,12	18,98	19,84	20,7	21,57
Propano	16,47	17,25	18,04	18,82	19,61
Butano	16,24	17,02	17,79	18,56	19,34
Diesel	15,89	16,65	17,41	18,16	18,92

Teniendo en cuenta que para que la cantidad de aire presente dentro de la recamara del horno no supere la del Gas Natural tomamos un exceso de aire del 5 % y calculamos la cantidad de aire requerida dentro del horno para poder realizar el proceso

Por la tanto tenemos que

$$AR = 18,12 * \frac{120\text{Kg}}{h} = 2,174\text{Kg/h}$$

Se convierte el resultado a m<sup>3</sup> por Hora:

$$AR = (2,174\text{Kg/h})/1,29$$

$$AR = 1,6\text{m}^3/\text{h}$$

A partir del resultado de la ecuación anterior se calcula la potencia requerida por el ventilador interno para producir la cantidad de aire requerido para mantener el proceso.

Por lo tanto:

$$Pv = AR * PV$$

Donde

Pv = Potencia del Ventilador

AR = Aire requerido por el proceso

PV = Presión del Ventilador

Entonces:

- Si 1,7 m<sup>3</sup> representan 1cfm se puede decir que 1685 m<sup>3</sup>/h son 991 cfm

Multiplicando por la presión atmosférica y el factor de conversión

$$Pv = 991 * 10339 * 0,000001486$$

Hallamos la potencia requerida por ventilador para funcionar

$$Pv = 1,3kv$$

**Cálculo del tiempo de calentamiento del aire en el interior del horno.**

$$T = \frac{(m * Cp * Dt)}{0.92Qs - Qp}$$

Donde:

T= Tiempo de Calentamiento

M= Masa de la carga

Dt= Delta de tiempo

Qs= calor requerido por ciclo

Qp= Pérdidas totales de Calor

Entonces:

$$T = \frac{(m * 1.005 * 168,5 - 165)}{0.715 - 0,620}$$

$$T = \frac{(1,2 * 1.005 * 168,5 - 165)}{0,92(0.715) - 0,620}$$

$$T = \frac{(1,2 * 1.005 * 3,5)}{0,0378}$$

$$T = 111,6sg$$

#### Calculo de los quemadores

Teniendo en cuenta la tabla 4:

	Presión en Mbar	
Potencia	50	100
100	1"	3/4"
250	1 1/2"	1"
500	1 1/2"	1 1/2"

Tabla 4. Relación de potencia con respecto a la presión para hallar el diámetro de los quemadores

Realizando una regla de tres podemos determinar el diámetro de la tubería a usarse dentro del horno para garantizar el suministro del GN para el proceso



Si para una potencia de 100 requerimos una red de tuberías de 1" entonces cuando sería necesario para una potencia de 32

Por lo tanto se tiene que

$$X = 32 * 1 / 100$$

$$X = 0,32$$

Si se dice q 1 "es igual a 2,54 cm entonces 0,32" equivalen a 0,8128 cm es decir este sería el diámetro de la tubería a usarse

$$0,8128 \text{ cm}$$

Se utilizaran en el diseño de los quemadores del horno las características presentes en las tablas número 8, 9 y 10.

- Potencia para encontrar el diámetro del inyector, distancia del inyector, los ángulos y las distancias de los conos convergentes y divergentes para el Venturi. Véase Tabla 8.
- Longitud del quemador, el diámetro de la tubería que conducirá el gas, el diámetro de los orificios. Véase Tabla 9.
- Diámetro de orificios y número de orificios, tubería que contendrá los orificios. Véase Tabla 10

Tabla 8 Dimensión de tubo Venturi

Potencia S.N.M p=760 mm Hg T= 0°C P(n)	Potencia P.A.Z p=400 mm Hg T= 12°C P(Lp)	Diametro Inyector GLP (mm) Di GLP	Diametro Inyector GN (mm) Di GN	Distancia garganta Inyector(m m) Lig	Cono Divergente				Cono Convergente		CONDUCTO Principal de quemador	
					(mm)	(mm)	Angulo del cono	Angulo de inzado	(mm)	(mm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Diametro (mm)
20,75	15,77	2,32	3,61	98,3	446,09	633,7	5	15	75,04	106,6	22,31	53,3
21	15,3	2,34	3,63	99	446,71	637,6	5	15	75,69	106,84	22,58	53,62
21,25	16,15	2,35	3,65	99,29	451,44	641,29	5	15	75,94	107,66	22,65	52,94
21,5	16,34	2,37	3,67	99,79	454,08	645,05	5	15	76,39	106,51	23,12	54,25
21,75	16,53	2,38	3,69	100,28	458,79	648,79	5	15	76,83	109,14	23,39	54,27
22	16,72	2,39	3,72	100,72	459,33	652,5	5	15	77,27	109,54	21,68	54,88

(Garcia Mena, 2010, pág. 8)

De la tabla 8 se hallan los diferentes valores de longitud del quemador, diámetro de los agujeros para los quemadores, N° de agujeros, y las diferentes potencias para los quemadores que se vayan a utilizar en la realización del mismo:

Tabla 9 Longitud de quemador y diámetro de orificios

Potencia S.N.M p=760 mm Hg T= 0°C P(n)	Potencia P.A.Z p=400 mm Hg T= 12°C P(Lp)	DIAMETRO TUBERIA		dc= DIAMETRO DE LOS ORIFICIOS									
				0,04688		0,0625		0,09375		0,10938			
				1	1,19	1,5	1,59	2	2,38	2,5	2,78	3	
		D ext plg	D ext en mm	L=LONGITUD DE RAMA (mm)									
0,5	0,38			176	149	119	113	91	77	73	67	62	
1	0,76			347	293	233	220	176	149	142	128	119	
1,5	1,14	0,625	15,98	518	436	347	328	262	221	210	190	176	
2	1,52			690	580	461	436	347	293	279	251	233	
2,5	1,9			861	724	575	543	433	365	347	313	290	
3	2,28	0,875	22,22	1032	868	690	651	516	456	416	350	317	
3,5	2,66			1203	1012	804	758	644	509	454	436	434	
4	3,04	1 1/4	31,75	1374	1115	918	866	690	580	553	497	481	
4,5	3,42			1545	1299	1032	974	775	652	621	559	518	
5,5	4,18			1887	1567	1260	1159	946	796	758	582	632	
6	4,56	1 3/8	34,92	2059	1731	1374	1297	1032	883	826	744	690	
6,5	4,94			2230	1875	1488	1404	1117	940	895	805	747	
7	5,32			2401	2016	1502	1512	1203	1012	963	867	804	
7,5	5,7	1 1/2	38,01	2572	2162	1716	1619	1289	1084	1032	928	861	
8	6,08			2743	2306	1830	1727	1374	1155	1100	9909	918	

(Garcia Mena, 2010, pág. 9)

Tabla 10 Longitud de quemador, diámetro de orificios y potencia.

Potencia S.N.M p=760 mm Hg T= 0°C P(n)	Potencia P.A.Z p=400 mm Hg T= 12°C P(Lp)	DIAMETRO TUBERIA		dc= DIAMETRO DE LOS ORIFICIOS							
				0,04688		0,0625		0,09375		0,10938	
				1	1,19	1,5	1,59	2	2,38	2,5	2,78
		D ext plg	D ext en mm	N=NUMERO DE ORIFICIOS							
0,5	0,38			68	48	30	27	17	12	11	9
1	0,76	5/8	15,98	137	97	61	54	34	24	22	18
1,5	1,14			205	145	91	81	51	35	33	27
2	1,52			274	193	122	108	68	49	44	35
2,5	1,9	7/8	22,22	342	242	152	135	86	60	55	44
3	2,28			411	290	183	162	103	73	66	53

(Garcia Mena, 2010, pág. 9)

## Material standard de fabricación de los quemadores

Cuerpo principal: Acero al carbono A37

Boca llama: Acero inox. 304 - 316

Plato difusor: Acero inox. 310

Lanza y/o cabezal inyector: A-37

## Modelamiento Matemático y desarrollo del control

### Capacitancia de la carga

C1: Se calcula a partir de la expresión  $C_1 = m \cdot c_1$ ; Donde m es la masa de la carga y  $c_1$  es el calor específico de la carga.

Calor específico del producto =

$$C_1 = 0,97 \frac{W/h}{^{\circ}C \cdot kg} \quad (3.27)$$

Dando como resultado

$$C_1 = 3,88 \frac{W/h}{^{\circ}C} \quad (3.28)$$

### Capacitancia de la fuente de calor C2 (Resistencias):

Es la capacitancia del volumen de aire caliente que está en contacto con la carga. Para el aire caliente a 220 °C, se tiene:

### Calor específico del aire

$c_p = 1012 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}C$  se pasa de joule a vatios hora  $c_p = 0.28 \text{ wh/kg} \cdot ^{\circ}C$

$$C_p = 0.28 \frac{W/h}{^\circ C} \quad (3.29)$$

Densidad:  $D = 1,4545 \frac{Kg}{m^3} \quad (3.30)$

D=M/V  
D=3.2 Kg /2.2m<sup>3</sup>

Calor especifico  
Calor = M\*Calor especifico

$$C_2 = 0,896 \frac{W/h}{^\circ C} \quad (3.31)$$

Capacitancia de las paredes

$$C_3 = 34,2 \frac{W/h}{^\circ C} \quad (3.32)$$

Reemplazando en la ecuación (3.26) los valores hallados da como resultado:

$$T \frac{d^2 T_1}{dt^2} + \frac{(C_1+C_2+C_3) dT_1}{(C_2+C_3) dt} = \frac{U^2}{R} \frac{1}{(C_2+C_3)} \quad (3.33)$$

$$T \frac{d^2 T_1}{dt^2} + \frac{(0,97+0,896+34,2) dT_1}{(0,896+34,2) dt} = \frac{U^2}{R} \frac{1}{(0,594+34,2)} \quad (3.34)$$

$$T \frac{d^2 T_1}{dt^2} + \frac{(36,066) dT_1}{(35,096) dt} = \frac{1}{(39,96)} dq/dt \quad (3.35)$$

$$T \frac{d^2 T_1}{dt^2} + \frac{(36,066) dT_1}{(39,96) dt} = (39,96) dq/dt \quad (3.36)$$

$$T \frac{d^2 T_1}{dt^2} + 0,9025 \frac{dT_1}{dt} = 39,96 dq/dt \quad (3.37)$$

$$\frac{T(s)}{Q(s)} + 0,9025 \frac{dT_1}{dt} = 39,96 dq/dt \quad (3.38)$$

Función De transferencia:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{39,96}{Ts+0,9025} \quad (3.39)$$

Cálculos realizados para determinar la interpolación de los datos que permitan analizar el comportamiento del proceso en un intervalo de tiempo como se representa en la figura 3.14

```
x=[0,30,60,90,120,150,180,210,240,270,300,330,360,390,420] ;
y=[25,50,75,100,125,150,175,200,205,210,215,220,221,222,225] ;
n=3; %(*polinomio de orden 3*)
p=polyfit(x, y, 3); %enter
xi=(0:150:5);% Crea 60 divisiones entre 0 y 1080
z= polyval (p, xi)%: evalúa el polinomio en xi
plot(x,y,'o',x,y,xi,z,'-')
```

El polinomio p obtenido por interpolación es:

$$P = -0.0011x^3 + 1.0584x^2 + 19.7817x$$

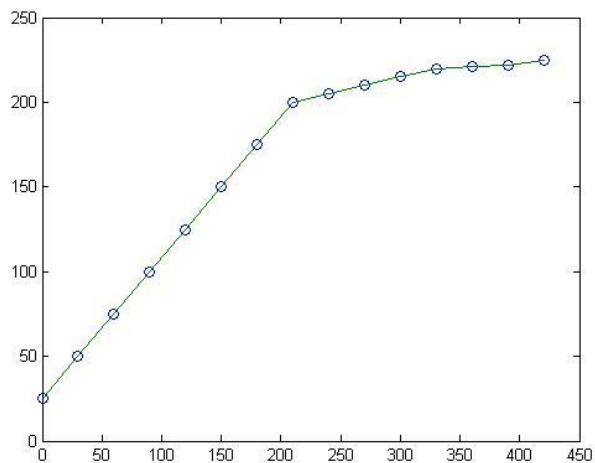


Figura 3.14 Modelamiento sistema térmico

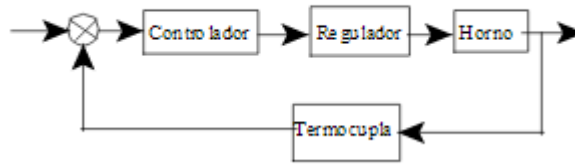
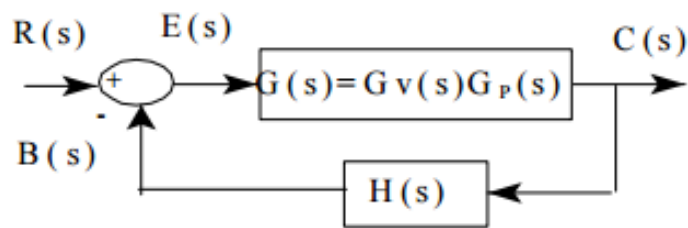


Figura 3.15 Elementos de regulación y control eléctrico

Función regulador

$$\frac{y(s)}{x(s)} = 1,32$$

Aplicar



Gs=función planta\*función regulador

$$g(s) = \frac{39,96}{Ts+0,9025} * 1,32 = \frac{52,7272}{rs+0,9025} \quad (3.40)$$

Aplicar retroalimentación

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{g(s)}{1+g(s)*H(s)} \quad (3.41)$$

$$H(s) = \frac{v(s)}{t(s)} = 0.0549 \quad (3.42)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{52,7274}{rs+0,9025}}{1 + \frac{52,7274}{rs+0,9025} * 0.0549} \quad (3.43)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{52,7274}{rs+0,9025}}{\frac{0,44+1,14+rs}{rs+0,9025}} \quad (3.44)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{52,7274}{0,44+0,9025 +rs} \quad (3.45)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{52,7274}{1,3425+rs} \quad (3.46)$$

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

Remplazando

$$C(s) = \frac{52,7274}{1,3425+rs} * \frac{1}{s} \quad (3.47)$$

Aplicando fracciones parciales

$$C(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{1,467+rs} \quad (3.48)$$

$$C(s) = \frac{1,43}{s} + \frac{1,43}{s+1,24/r} \quad (3.49)$$

3 Simulación del control .Desarrollo del control basado en los cálculos realizados en el capítulo # 3 donde se halló la función de transferencia y el comportamiento del sistema en un intervalo de tiempo en el cual la válvula que alimenta el mismo tiene un apertura entre el 20 y el 70 % que permite mantener la temperatura en el rango adecuado para que el polímero que va a sometido al proceso

Basado en la función de transferencia:



Función De transferencia:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} + \frac{dT_1}{dt} = \frac{39,96}{Ts+0,9025} \quad (6.3)$$

Y mediante el uso del software matlab se hallo la curva característica del sistema a traves de un intervalo de tiempo en el proceso como se puede apreciar en la figura 6.10 a continuación.

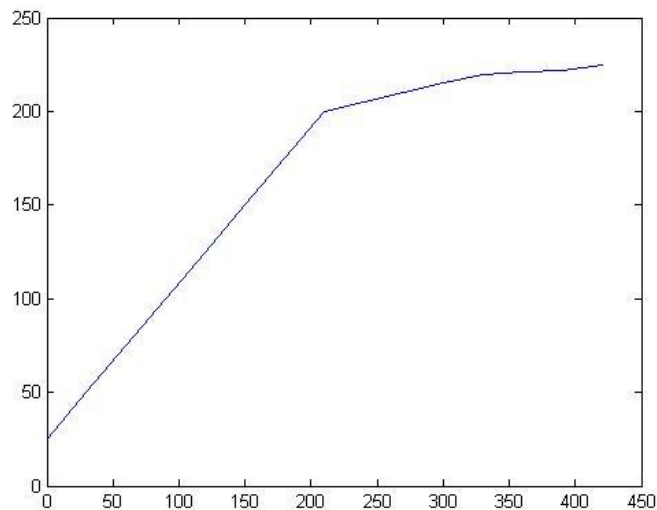


Figura 6.10 Curva de comportamiento del sistema

Para la implementación del control y su posterior desarrollo se realiza un código en MATLAB para poder determinar con exactitud los valores del control necesarios para que el proceso pueda regularse dependiendo de la temperatura , la apertura de la válvula y las posibles pérdidas y perturbaciones del entorno que puedan afectar el proceso y con ello evitar perdida de material , de tiempo de reproceso así como de un importante ahorro energético que finalmente resulta en un beneficio económico para la empresa.

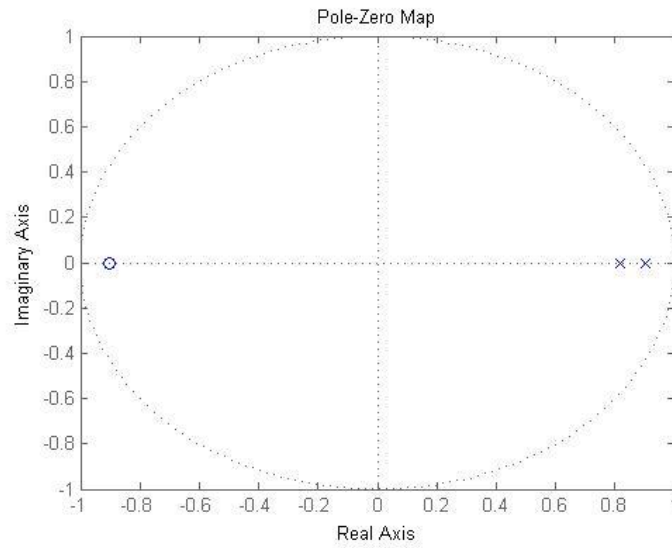
```

T = 0.01;
z=zpk('z',T)
%Funcion de transferencia de la planta
Gz=(0.00452*(z+0.90485))/((z-0.90483)*(z-
0.81873))
figure
%Ubicación Polos-Ceros de FT discreta
pzmap(Gz)
F=d2c(Gz,'zoh',T)
wn=0.1;
ro=0.1;
%Planta
sigma = wn*-ro;
wd = i*sqrt(1-ro^2)
z1= exp(-sigma*T)*(cos(wd*T)+ sin(wd*T));
z2= exp(-sigma*T)*(cos(wd*T)- sin(wd*T));
Ts= 4/sigma;
angulo_polo = atan(0.0100)/(1.0010+0.9048);
conv_angulo_polo = (180*angulo_polo)/pi;
angulo_cero = atan(0.0100)/(0.9048-1.001);
conv_angulo_cero = 180 -
(180*angulo_cero)/pi;

teta = conv_angulo_polo - conv_angulo_cero;
angulo_1 = 180+teta;
angulo_2 = -180+teta;
% como z0 arbitrario se toma z0=1
% angulo gama (z1-z0)- fi(angulo_1)
%tang de 6.64 = 0.116
po = 1.001 -(0.010/0.116);
%reemplazar
z1 = 1.001 + 0.010*i;
kcomp = 1/(((z1-1)/(z1-0.9148))*
((0.045*(z1+0.9048))/((z1-0.9048)*(z1-
0.8187))))
k_real = sqrt((-11.1363)^2+(4.1590^2))
Gc=11.8876*((z-0.8187)/(z-po))
Gz = tf (Gz)
Gc=tf(Gc)
G=Gc*Gz
hold on
figure
%Ubicación Polos-Ceros de FT discreta
pzmap(feedback(G,1))
F=d2c(G,'zoh',T)
%ubicacion polos.ceros de Ft continua
figure
rlocus(feedback(F,1))
%Respuesta a un escalon
Gc=11.8876*((z-0.8187)/(z-0.4532))
step(Gc) % respuesta del controlador
G_planta=(0.004528*(z+0.9048))/((z-
0.9048)*(z-0.8187))
step(G_planta) % respuesta de la planta
g=Gc*G_planta % respuesta de la planta con
el compensador

```

Diagrama de polos y ceros del sistema en análisis

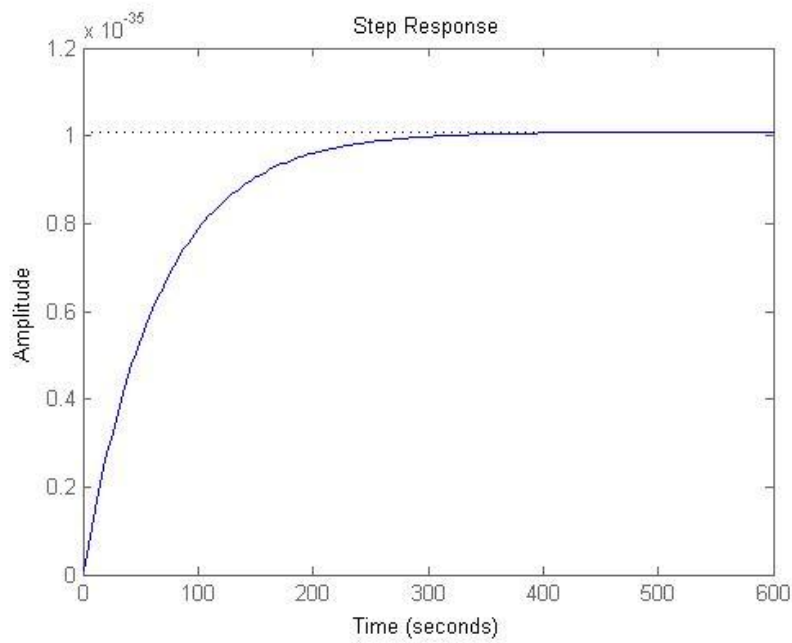


Identificación de la planta por el método de tiempo muerto

```
kp=230/184  
t75=172.5  
t25=100  
T=0.9102*(t75-t25)  
tm=(1.260*t25)-(0.2620*t75)
```

```
num= [kp*(exp(-tm))]  
den= [T 1]  
g1= tf(num,den)
```

```
f=feedback(g1,1)  
step (g1)
```



*Código realizado en matlab*

Teniendo en cuenta los tiempos en los que la válvula va a mantenerse en operación se realiza la simulación del proceso en diferentes instante de tiempo como se muestra en la imagen comprobando asi que el diseño del controlador debería garantizar de manera adecuada el control de la temperatura sin importa el grado de apertura de la válvula ni las perturbaciones estas entendidas como apertura de las puertas del horno , exceso de tiempo del material expuesto al paso de temperatura a través de él ,y una serie de factores que influyen directamente en el calentamiento de las láminas a procesar.

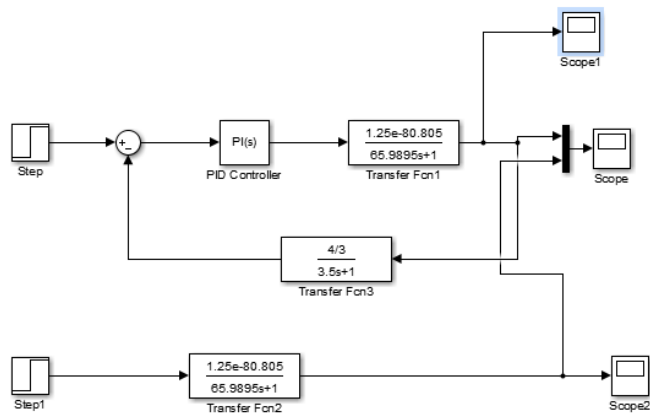


Figura 6.11 – simulación en diferentes instantes del tiempo

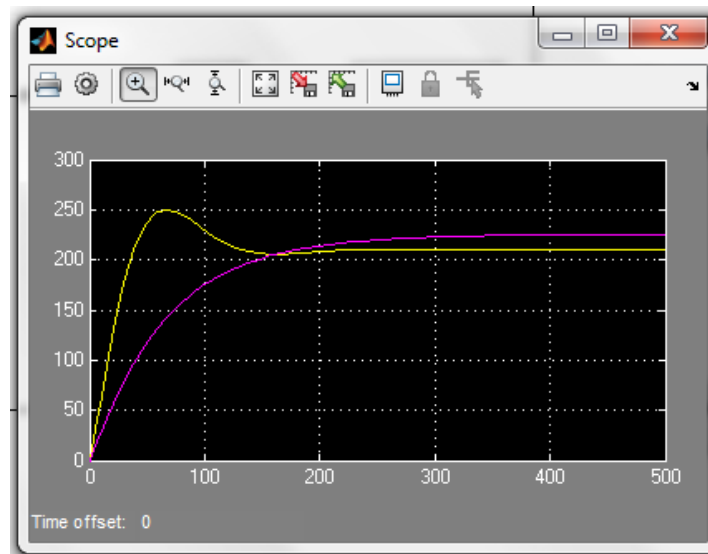


Figura 6.12 – Comparativa del comportamiento de la planta con respecto al control de temperatura realizado

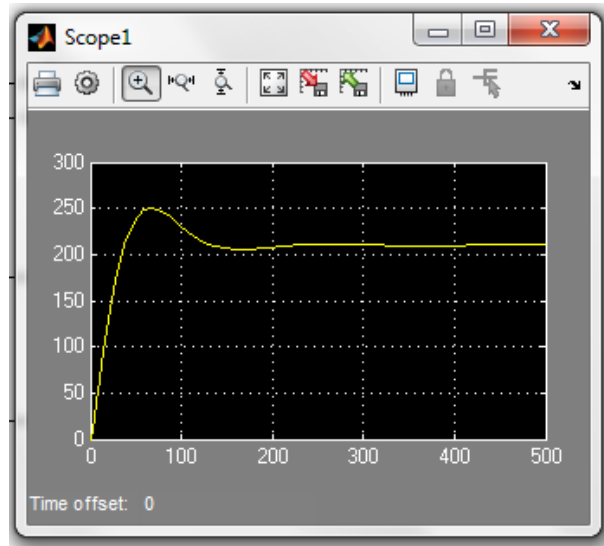


Figura 6.13 Detalle de la gráfica de control del proceso

## 5.1 SIMULACION DEL HORNO

El horno a diseñar se representa en la figura 5.1, y 5.2 respectivamente dando lugar a una mejora con respecto al que se tenía en cuenta inicialmente.



Figura 5.1 Vista frontal del horno

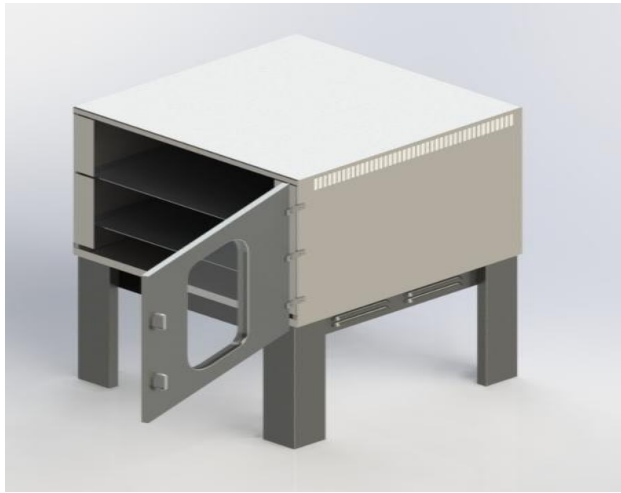


Figura 5.2. Vista isometrica del horno  
Medidas del Horno / Isometrico

