

# Análisis de eficiencia energética utilizando control *on-off* y PID en una resistencia calefactora

*Energy efficiency analysis using control on-off and PID in a resistance heating*

**FREDDY YAMITH CUBIDES ALFONSO**

Tecnólogo en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *freddy.cubides@gmail.com*

**JEIMY ALEXANDRA MARTÍNEZ ROJAS**

Tecnóloga en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *memismaro@gmail.com*

**LUIS ANTONIO NOGUERA VEGA**

Ingeniero en Distribución y Redes Eléctricas, especialista en Informática y Automática Industrial y docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *lanogueraf@udistrital.edu.co*

Fecha de recepción: 15 de agosto de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 1 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**Palabras clave:** aislamiento térmico, control *on-off*, control PID, extrusora, pirómetro.

**Key words:** Extruder, on-off control, PID control, pyrometer, thermal insulation.

## RESUMEN

El presente artículo contiene los resultados obtenidos en la ejecución de las actividades propuestas para dar cumplimiento al análisis de eficiencia energética de una resistencia calefactora de uso en extrusoras de plástico reciclado. Este análisis

tiene como objetivo observar el comportamiento de la resistencia calefactora en tres casos: en primer lugar, al ser energizada en corriente alterna y corriente continua; en segundo lugar, al disponer de un sistema de control *on-off* y PID, y por último al incorporarle un aislante térmico. Para cada caso las variables objeto de estudio son el

consumo de energía eléctrica y la estabilidad de la temperatura. Con el control PID y la incorporación del aislante se obtiene un ahorro energético y una mejor estabilidad en la temperatura.

## ABSTRACT

In this article are the results of the analysis of energy efficiency for a resistance of heater in ex-

truders recycled plastic. It observes the behavior of the heating resistance for three cases: when connected to alternating and direct current, by means of a control system ON-OFF and PID, and finally introducing a thermal insulator. In all three cases, the measured variables are the power consumption and temperature stability. Obtained introducing the PID control and the application of insulation, an improved temperature stability and increased energy savings.

\* \* \*

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, las industrias demandan un elevado consumo de energía eléctrica para ejecutar el procesamiento de materias primas. La industria de los plásticos, siendo una de las actividades manufactureras más dinámicas, no es la excepción, pues su consumo energético equivale al 7 % del consumo total de la actividad manufacturera (Arévalo, 2012) consumo el cual ha ido aumentando debido al crecimiento anual del 7 % (Gaitan, 2004). Estudios realizados del consumo energético en la industria de los plásticos muestran que cerca del 60 % de la energía eléctrica es empleada por los equipos de procesamiento y el 30 % es consumido por las resistencias calefactoras (Novoa). De esta manera, se estima que los costos de energía eléctrica corresponden al 4 % hasta 10 % de los costos operacionales de las empresas de transformación de plásticos (Naranjo, 2012).

En la actualidad, de las 312 empresas nacionales más destacadas del sector de los plásticos, el 54 % realiza su actividad económica en Bogotá, donde se destacan las localidades de Bosa, Kennedy, Puente Aranda y Tunjuelito, así como los municipios de Funza y Soacha. Dentro de este grupo, el 8 % desarrolla procesos de almacenamiento, recuperación, reciclaje y comercialización de resinas plásticas (Corredor, 2010). Gran parte de estas empresas son de carácter informal y no tienen la solvencia económica para adquirir equipos

automatizados; por lo tanto, trabajan con elementos más sencillos y de menor costo, pero con sistemas de control ineficientes que no se ajustan a las normas de seguridad en cuanto a la exposición de zonas con temperaturas mayores a los 44 °C. Esta situación conlleva el aumento de consumo de energía eléctrica, disminución en la calidad del plástico procesado y riesgo de quemaduras.

En concordancia con la Ley 697 de 2001 y la ISO-50001, normas que fomentan el uso racional y eficiente de la energía eléctrica, se muestran en este artículo los resultados de las actividades que se ejecutaron con el objetivo de mejorar la estabilidad en la temperatura de una resistencia calefactora, principal componente de la etapa de extrusión (proceso mediante el cual se transporta el plástico triturado en forma de gránulos o pellets y se funde mediante la acción de las resistencias calefactoras, por último el plástico pasa por un dado o boquilla encargado de dar la forma al producto final), hacer un uso eficiente de la energía eléctrica y reducir el riesgo de quemaduras, a través de la comparación de mediciones de energía eléctrica y temperatura en tres casos:

- La resistencia calefactora energizada en corriente alterna y corriente continua.
- La resistencia calefactora con un sistema de control *on-off* y PID.

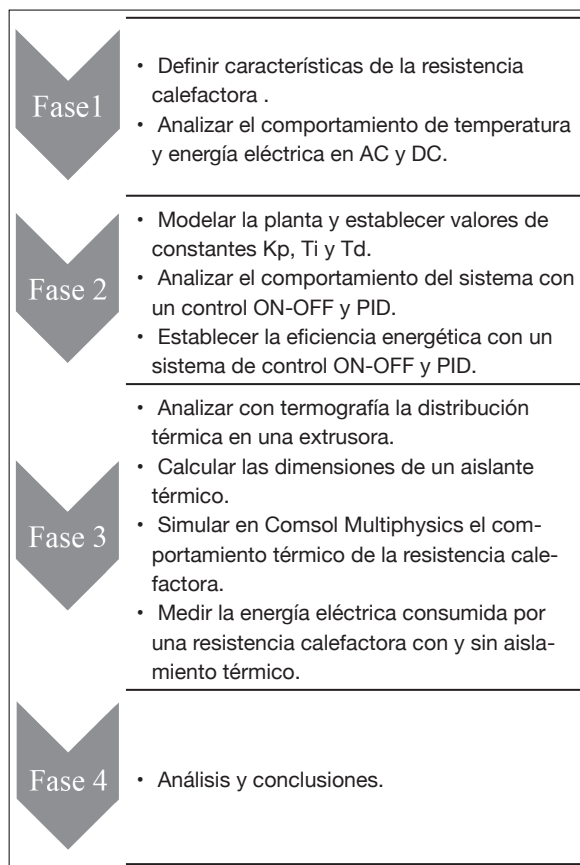
# investigación

- La incorporación de un aislante térmico a la resistencia calefactora.

Al final del documento se presentan las conclusiones correspondientes a cada caso donde se determina cuál es la mejor opción para generar un ahorro de energía eléctrica y de costos operacionales.

## METODOLOGÍA

En la figura 1 se realiza una breve descripción de los pasos que se ejecutaron para cumplir con el desarrollo del proyecto; cada fase describe los parámetros iniciales y procedimientos empleados.



**Figura 1.** Estructura de la metodología

Fuente: elaboración propia.

Esta metodología describe inicialmente la caracterización de la resistencia, con la cual se proce-

dió a determinar su comportamiento en corriente continua y alterna, información que permitió determinar el modelo de la planta y con ello proceder a la incorporación de los sistemas de control *on-off* y PID que permitieron establecer su comportamiento. Seguidamente, se plantean mediciones con termografía y la incorporación de un aislante térmico, datos que se compararon con simulaciones. Con esto finalmente se analiza la información que permita concluir.

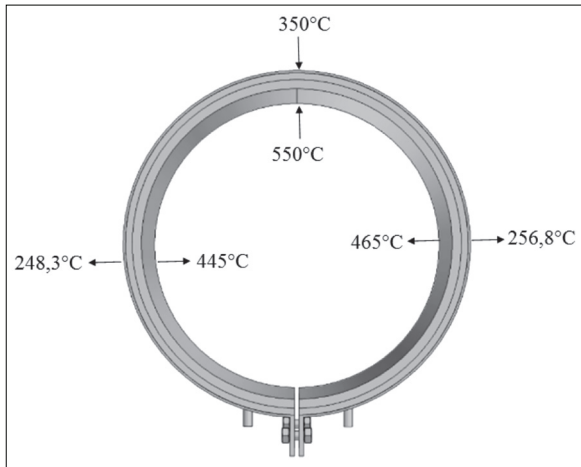
## CRITERIOS Y ENSAYOS PRELIMINARES

En esta etapa se definieron criterios y ensayos que establecieran las condiciones nominales de la resistencia, en temperatura y consumo de energía en corriente alterna y corriente continua.

### Características y distribución de temperatura en la resistencia

Se seleccionó una resistencia calefactora tipo banda de 1700 W, 208 V, 15 cm de diámetro y 12 cm de longitud. Este tipo de resistencia está construida por una serie de materiales que pueden variar dependiendo de su fabricación, y cumplen la función de aislar, asegurar y generar calor.

Con el fin de establecer si la distribución de calor en la resistencia calefactora era uniforme y determinar cuál era el punto de mayor concentración de temperatura, se energizó la resistencia a tensión nominal y se llevaron a cabo mediciones de temperatura en su superficie, como se ilustra en la figura 2. Como resultado de las mediciones se estableció que el punto de mayor concentración de calor se encuentra en el centro de la resistencia y por tanto será el más adecuado para instalar el termopar que registre la variación de temperatura.



**Figura 2.** Temperatura en diferentes puntos de la resistencia calefactora

Fuente: elaboración propia.

### Análisis energético en corriente alterna y corriente continua sin control de temperatura

Con el fin de observar el comportamiento de la resistencia calefactora y capturar las curvas de temperatura necesarias para construir el modelo del sistema, se establecieron cuatro valores de tensión (50V, 100V, 150V y 208V) para energizar la resistencia por un periodo de 60 minutos, partiendo de una temperatura ambiente aproximada de 20°C.

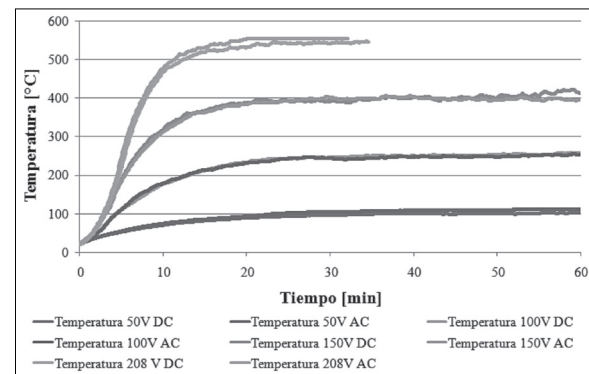
**Tabla 2.** Límites de temperatura

Rangos de temperatura		
Tensión [V]	Fuente de alimentación DC	Fuente de alimentación AC
	Temperatura [°C]	Temperatura [°C]
50	102,5	111,5
100	258,3	255,1
150	421,7	416,5
208	546,8	554,5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se muestra el registro de los valores máximos obtenidos para cada nivel de tensión.

Al comparar los datos se tiene que la temperatura difiere un 8,78 % a 50V, 1,25 % a 100V, 3,73 % a 150V y un 1,4 % a tensión nominal. De acuerdo con lo anterior, se evidencia que la diferencia promedio no supera el 4 %, es decir que la variación de la temperatura para cada fuente de alimentación no es significativa y por tanto no genera efectos relevantes en el comportamiento de la resistencia calefactora.



**Figura 3.** Curvas de temperatura con fuente de alimentación en AC y DC

Fuente: elaboración propia.

En la figura 3 se observan las curvas de temperatura obtenidas al energizar la resistencia calefactora en corriente continua y corriente alterna, con los cuatro rangos de tensión definidos. Con esto se evidencia que a mayor tensión, mayor temperatura y menor tiempo de estabilidad.

**Tabla 3.** Registro de consumo de energía

Energía [kW·h]		
Tensión [V]	Fuente de alimentación DC	Fuente de alimentación AC
	Energía [kW·h]	Energía [kW·h]
50	0,085 + 0,023	0,086
100	0,34 + 0,098	0,34
150	0,781 + 0,164	0,766
208	1,49 + 0,315	1,47

Fuente: elaboración propia.

La tabla 3 muestra el registro del consumo de energía eléctrica en corriente alterna y corriente continua. Para el caso en corriente continua fue necesario el uso de una fuente rectificadora, que incrementó el consumo de energía en un 23 % para el grupo resistencia y fuente rectificadora.

## MODELADO DEL SISTEMA

Después de realizar los diferentes ensayos se tomaron las curvas de temperatura y se analizaron con el fin de obtener el modelo de la planta; igualmente, se definieron los valores característicos de las ganancias del sensor y el relé de estado sólido. Por último se obtuvo el modelo que representa todo el sistema calefactor, el cual se simuló y analizó para obtener los datos necesarios para la configuración del controlador PID.

### Pasos para el modelado del sistema

Para ejecutar el modelado del sistema y determinar las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  necesarias para configurar el controlador de temperatura PID se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Definir el rango de referencia y los rangos de entrada y salida para cada bloque.
- Calcular las ganancias de los bloques y la ganancia adicional del sensor de acuerdo con la ecuación (1). Los resultados se muestran en la tabla 4. La salida del lazo de realimentación debe estar en voltios; por lo tanto, es necesario multiplicar el rango de salida del sensor por 1000.

$$G(s) = \frac{\text{Rango max salida} - \text{Rango min salida}}{\text{Rango max entrada} - \text{Rango min entrada}} \quad (1)$$

- Calcular el tiempo de retardo ( $L$ ) y la constante de tiempo ( $T$ ) de acuerdo con el método de Ziegler-Nichols (ver figura 4), a partir de las curvas de temperatura.

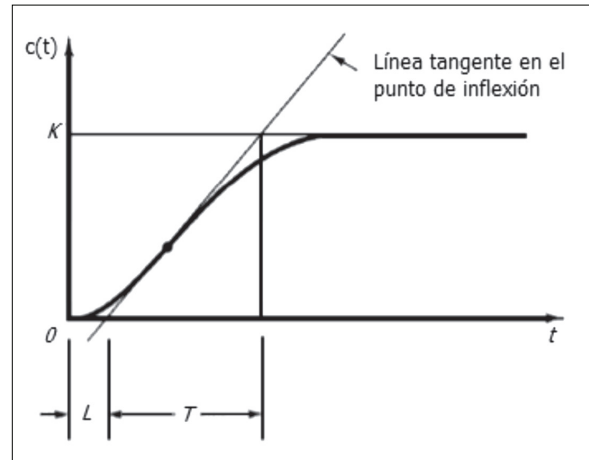


Figura 4. Curva de respuesta

Fuente: (Ogata, 1998).

- Definir la función de transferencia de la planta de acuerdo con la siguiente ecuación (2).

$$\frac{c(s)}{u(s)} = \frac{Ke^{Ls}}{Ts + 1} \quad (2)$$

- Definir el rango de entrada y la ganancia inicial del controlador.
- Construir el diagrama de bloques del sistema por modelar en el *software* Simulink, incluyendo los bloques de saturación a la entrada de cada elemento, e ingresar el límite máximo y mínimo de acuerdo con los rangos definidos anteriormente.
- Configurar el bloque PID y autosintonizarlo.
- Simular el sistema y observar la forma de respuesta.
- Observar el comportamiento de las señales de entrada y salida de cada bloque con el fin de comprobar que no se presenta saturación.
- Configurar el controlador de temperatura (pirómetro), ingresando las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  calculadas.

## Resultados del modelado de la planta

Para cada etapa se definieron los rangos de entrada y salida, y los valores de las ganancias de cada bloque (ver tabla 4).

**Tabla 4.** Rangos de entrada y salida

Bloque	Entrada	Salida	Ganancia
Referencia		0 – 550 [°C]	NA
Control PID	-550 -550 [°C]	0-12 [V]	NA
SSR	0-12 [V]	0-208 [V]	17.33
Planta	0-208 [V]	0 – 550 [°C]	2.64
Sensor	0 – 550 [°C]	0-22 [mV]	40e-3
Ganancia Adicional	0-22 [V]	0 – 550 [°C]	25

Fuente: elaboración propia.

- El tiempo de retardo  $L$  (140 s) y la constante de tiempo  $T$  (384 s) se calcularon a partir de la curva de temperatura a condiciones nominales.
- La función de transferencia de la planta se construye a partir de los valores de la ganancia, el tiempo de retardo y la constante de tiempo; la ecuación (3) es solución a la ecuación (2).

$$H(s) = \frac{2,64e^{-140s}}{384s + 1} \quad (3)$$

- El cálculo de la ganancia inicial se hace a partir de los rangos de entrada y salida del controlador; de esta manera la ganancia inicial es igual a 0,022.
- Al ejecutar en Matlab la herramienta autosintonización se obtienen los valores de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , así como la señal de respuesta del bloque de control PID y sus características, como se muestra en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5.** Constantes controlador PID

Constante	Valor
P	34.34e-3
I	92.44e-6
D	609.54e-3
Filtro	460.88e-3

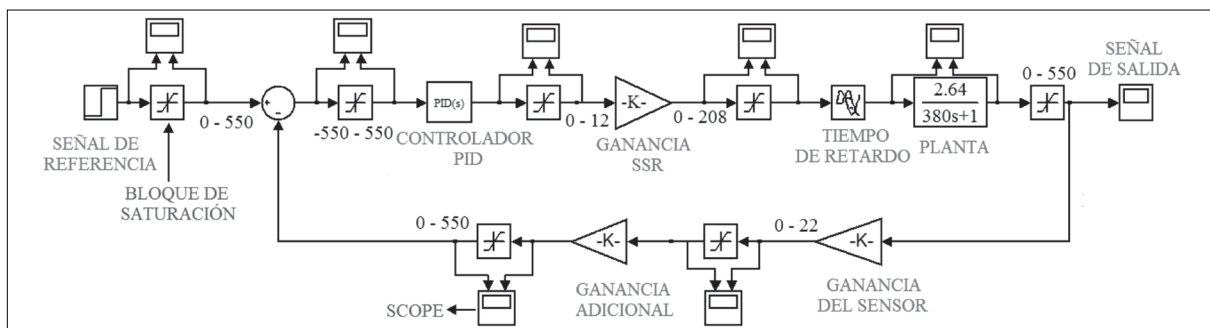
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Característica de respuesta del controlador PID

Rise time [s]	238
Settling time [s]	886
Overshoot [%]	5,3

Fuente: elaboración propia.

Después de obtener todos los valores de constantes y parámetros del sistema se construyó el modelo completo utilizando la herramienta de Matlab Simulink, como se observa en la figura 5.

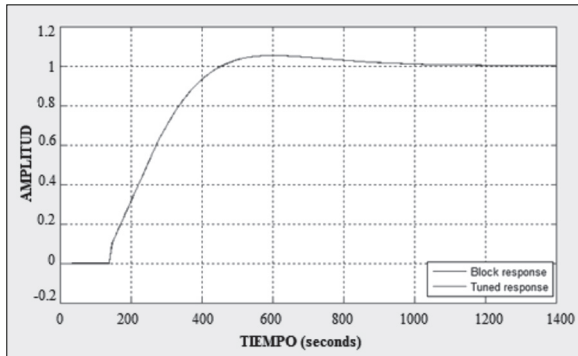


**Figura 5.** Modelo del sistema

Fuente: elaboración propia.

# investigación

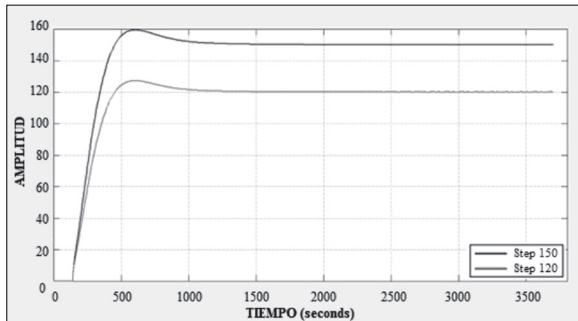
La figura 6 muestra la señal de respuesta del bloque del controlador PID con los valores calculados por Matlab para las constantes  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  y el filtro.



**Figura 6.** Señal de respuesta al bloque PID

Fuente: elaboración propia.

Para ejecutar la simulación del modelo que se ilustra en la figura 7 se tomaron valores de referencia de  $120^{\circ}\text{C}$  y  $150^{\circ}\text{C}$ . La señal de salida para cada caso se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Respuesta para temperatura de referencia de  $120^{\circ}\text{C}$  y  $150^{\circ}\text{C}$

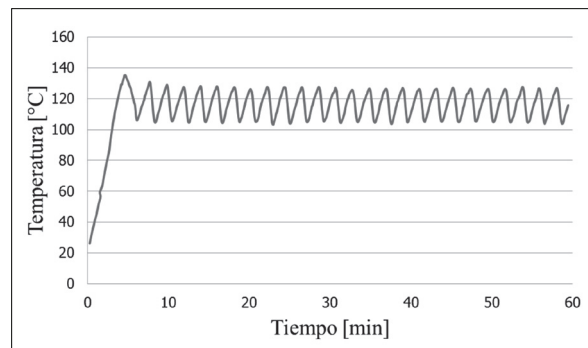
Fuente: elaboración propia.

## Análisis energético y térmico de la resistencia calefactora con un sistema de control *on-off* y PID

Después de obtener el modelo del sistema se procedió a controlar la resistencia calefactora, empleando dos tipos de control (*on-off* y PID), a través de los siguientes dispositivos:

- El sistema de control *on-off* con un termostato de horno eléctrico con un rango de temperatura de  $(0-300 [^{\circ}\text{C}])$ .
- El sistema de control PID con un controlador de temperatura (pirómetro) que trabaja de manera conjunta con un relé de estado sólido y un Optotriac de referencia MOC3021.

Para este caso se estableció una temperatura de referencia de  $120^{\circ}\text{C}$  y se incorporó un ventilador que simulará una carga para la resistencia. Hay que aclarar que al incorporar el ventilador el modelo de la planta cambió y se definieron nuevas constantes del controlador. Los ensayos se realizaron por periodos de una hora, en la que se registraron el consumo de energía eléctrica y la variación de temperatura.



**Figura 8.** Curva de temperatura control *on-off*

Fuente: elaboración propia.

La figura 8 ilustra el comportamiento de temperatura con el control *on-off*, el cual es oscilante en  $\pm 12^{\circ}\text{C}$ . Esta situación puede ser perjudicial para procesos en los que la temperatura no permite variaciones significativas. El consumo de energía eléctrica de la resistencia calefactora con el sistema de control *on-off*, registrado en una hora, fue de  $1,18 \text{ kW}\cdot\text{h}$  para una temperatura de referencia de  $120^{\circ}\text{C}$ .

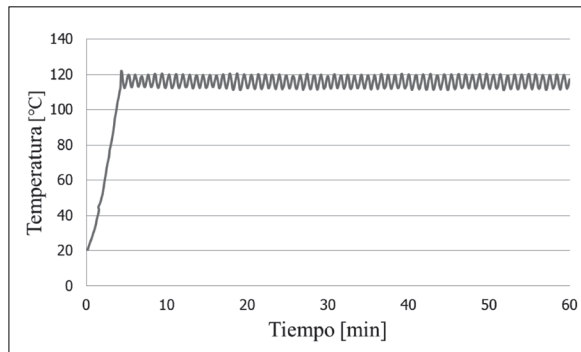
El dispositivo de control de temperatura PID (pirómetro) incorpora tres modos de control que se

diferencian entre sí de acuerdo con el recorte que hacen a la señal de control; por lo tanto, se realizaron ensayos en cada modo de control, donde se observó un menor consumo de energía eléctrica en el modo *phase* (ver tabla 7).

**Tabla 7.** Consumo de energía eléctrica modos de control

Modo de control	Energía [kW·h]
Phase	0,92
Cyclo	0,93
Stand	0,95

Fuente: elaboración propia.



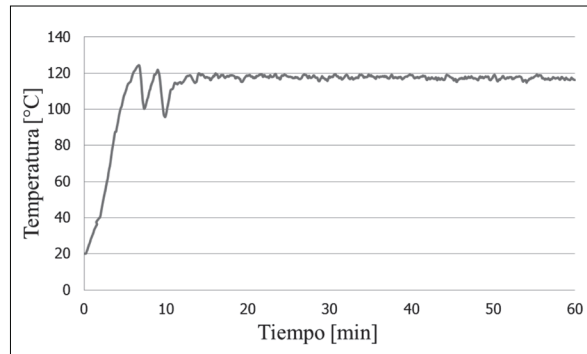
**Figura 9.** Curva de temperatura control PID

Fuente: elaboración propia.

A diferencia del modo de control *on-off*, el control PID presenta oscilaciones de menor amplitud (ver figura 9). Las oscilaciones que se observan se debieron a que el controlador de temperatura tiene definido por defecto en modo manual una histéresis del 2%.

El controlador de temperatura seleccionado para el desarrollo del proyecto cuenta con un modo de autosintonización, el cual no requiere introducirle de forma manual los valores de las constantes ( $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ); por consiguiente, no es necesario calcular el modelo de la planta, debido a que lo hace automáticamente. De acuerdo con la figura 10, se observa que se presentan oscilaciones relacionadas, al tiempo que tarda en calcular las

constantes, tiempo que equivale a 8 minutos aproximadamente.



**Figura 10.** Curva de temperatura control PID autosintonización

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 8, se observa que el control *on-off* registra un mayor consumo de energía eléctrica correspondiente al 26,42% comparado con los modos de control PID, de los cuales el modo *phase* presenta un menor consumo de energía eléctrica. Para el caso de autosintonización, se observa un mayor consumo de energía comparado con el control *on-off* y los modos de control PID, mientras que la temperatura presenta oscilaciones de menor amplitud en cuanto a los otros tipos de control.

**Tabla 8.** Consumo de energía y estabilidad térmica tipos de control

Tipo de control	[kW·h]	Estabilidad de Temperatura
on-off	1,18	Mala
PID	Phase	Buena
	Cyclo	Buena
	Stand	Regular
	Autosintonización	Muy buena después de 8 min.

Fuente: elaboración propia.



## INCIDENCIA DEL AISLANTE TÉRMICO EN LA RESISTENCIA CALEFACTORA

Los ensayos realizados en el capítulo 5 no contemplaban un aislante térmico que disminuyera la transferencia de calor al exterior de la resistencia, la cual no es aprovechada en este tipo de dispositivos y se considera como pérdidas de energía calorífica. Por esta razón, se decidió especificar un aislante térmico que redujera la transferencia de calor al exterior y ver en qué medida el aislante generaba ahorro de energía eléctrica.

Se decidió fijar una temperatura aproximada en el exterior de la resistencia de 200 °C, con el fin de establecer las dimensiones del aislante térmico para un material específico. Para este procedimiento se realizó un cálculo matemático y simulaciones en el *software* Comsol Multiphysics, que permite simular sistemas termodinámicos.

### Dimensiones y características del aislante térmico

Para definir las dimensiones y material del aislante térmico se realizaron los siguientes pasos:

- Establecer temperatura ambiente.
- Establecer temperatura crítica en la superficie de la resistencia.
- Definir la temperatura máxima en la superficie del aislante térmico.
- Especificar el tipo de material de aislante térmico por utilizar.
- Calcular las dimensiones del aislante térmico aplicando las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) que involucran el intercambio de calor por convección, radiación y la estimación del espesor de aislamiento térmico (Atecyr, 2007).

$$h_{conv} = 1,52\sqrt[3]{\Delta T} \quad (4)$$

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(TK_{sup} + TK_{Air})(TK_{sup}^2 + TK_{Air}^2) \quad (5)$$

$$h_{convradint} = h_{conv} + h_{rad} \quad (6)$$

$$E_{sp} = \frac{k_i \left( T_{int} - T_{ext} - \left( \frac{1}{h_{conv\_radint}} + \frac{1}{h_{conv\_radext}} \right) \right)}{(T_{supext} - T_{ext}) \cdot h_{conv\_ext}} \quad (7)$$

Donde

$h_{conv} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ : coeficiente de transferencia por convección.

$h_{rad} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ : coeficiente de transferencia por radiación.

$h_{convradint} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ : coeficiente de transferencia por convección y radiación.

$\varepsilon$ : coeficiente de emisión de la superficie en estudio.

$\sigma \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$ : constante de Stefan-Boltzman (°).

$T_{supext} [°K]$ : temperatura superior externa.

$K_i \left[ \frac{W}{mK} \right]$ : constante de conductividad térmica del aislante.

Como temperatura ambiente se determinaron 20 °C, para la superficie de la resistencia se fijaron 200 °C y la temperatura máxima en la superficie del aislante 38 °C, que es un valor que no representa riesgo para la piel humana. El material del aislante térmico más empleado es la fibra de vidrio, por su bajo costo, resistencia al calor y baja conductividad térmica (0,035 W/mK). Por ello se decidió utilizarlo en este ensayo; resolviendo las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) se obtuvo lo siguiente:

$$h_{conv} = 10,30 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right], h_{rad} = 19,55 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right],$$

$$h_{convradint} = 29,86 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right], h_{convradext} = 25 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right],$$

$$E_{sp} = 25,66 [mm]$$

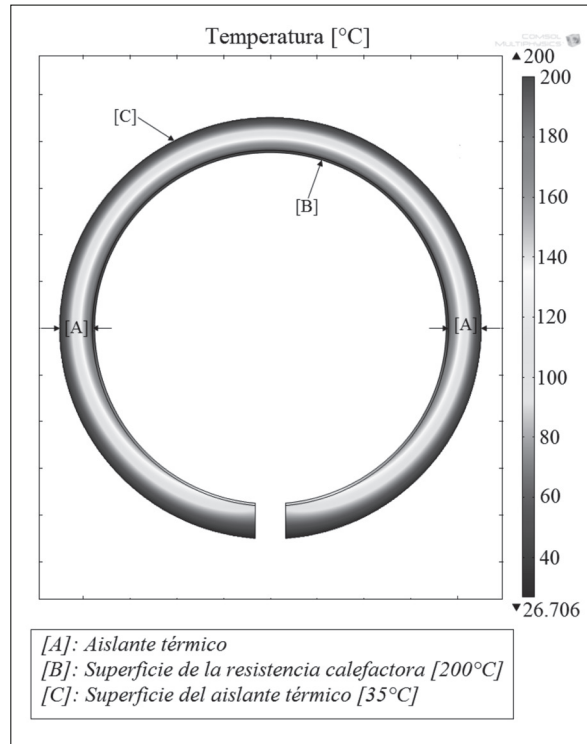
En la tabla 9 se presentan las dimensiones del aislante térmico, según la resistencia sometida a prueba.

**Tabla 9.** Dimensiones del aislante térmico

Dimensiones del aislante térmico	Dimensiones [cm]
Largo	47,87
Ancho	12,00
Espesor	2,56

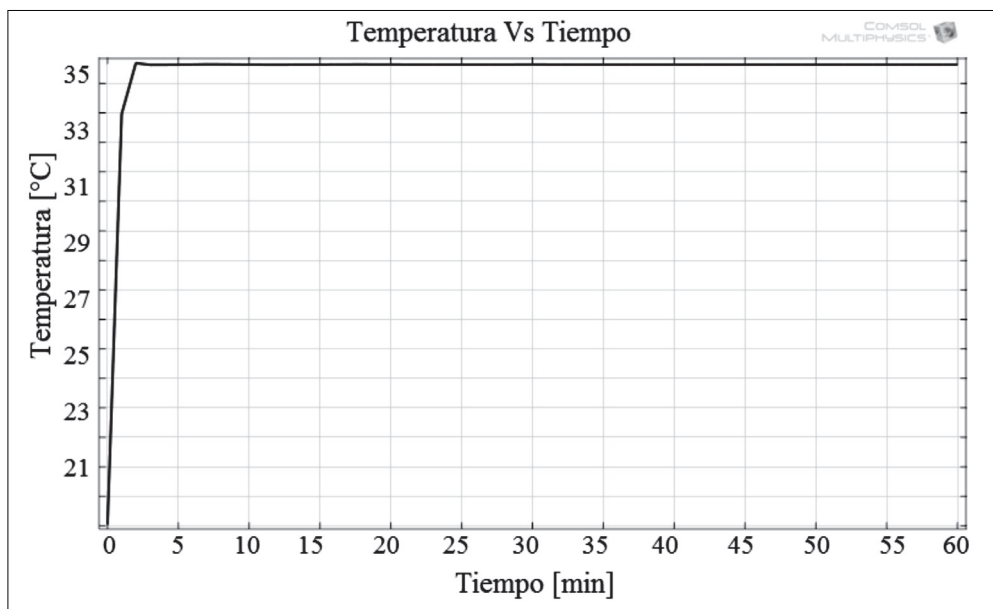
Fuente: elaboración propia.

Antes de incorporar el aislante calculado para la resistencia, se realizaron simulaciones con el *software* Comsol Multiphysics, el cual es un soporte para comprobar los datos obtenidos de forma manual y verificar la distribución de temperatura en el aislante.



**Figura 11.** Simulación con el aislante térmico

Fuente: elaboración propia.



**Figura 12.** Temperatura en la superficie del aislante

Fuente: elaboración propia.

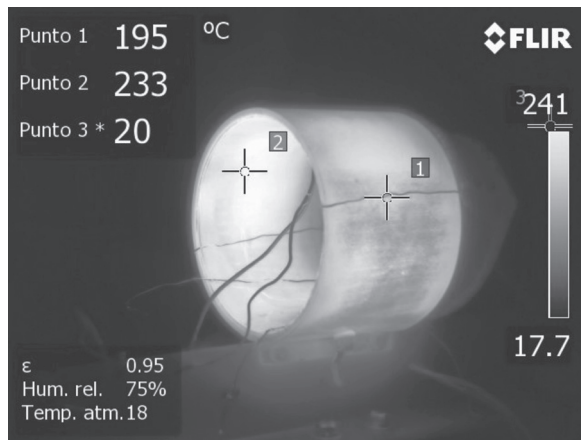
# investigación

Las figuras 11 y 12 corresponden a los resultados de la simulación de la resistencia calefactora al incorporar un aislante térmico. La superficie exterior de la resistencia se encuentra a una de temperatura de 200 °C, luego de incorporale el aislante térmico y tras 60 minutos de simulación la temperatura obtenida en la superficie exterior del aislante fueron 38,5 °C.

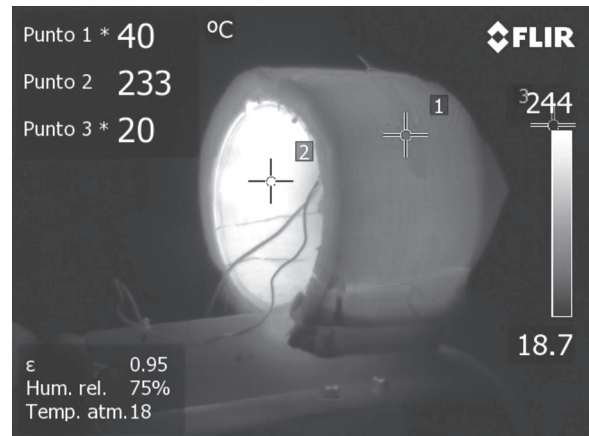
De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación, se determinó que las dimensiones establecidas para el aislante térmico son las adecuadas y se aproximan a los valores calculados teóricamente, con la diferencia que el simulador presenta resultados en el tiempo y la distribución de temperatura en el aislante.

## Comportamiento térmico con y sin aislamiento

Con las dimensiones establecidas en el capítulo anterior se realizaron pruebas en la resistencia calefactora con una manta de fibra de vidrio de 2,56 cm de espesor, la cual se le incorporó en la superficie de la resistencia y se procedió a registrar la temperatura y la energía eléctrica por un periodo de 2 horas, con y sin el aislante.



(a)



(b)

**Figura 13.** (a) comportamiento termográfico sin aislante térmico y (b) comportamiento termográfico con el aislante térmico

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 13 (a) y (b) se observan las diferencias térmicas registradas con una cámara de termografía, que determinó la distribución de temperatura con y sin aislante térmico, donde se aprecia una temperatura superficial de 195 °C sin aislante y luego de incorporar el aislante se registró sobre su superficie 40 °C; por lo tanto, las dimensiones del aislante térmico y el material seleccionado son los adecuados para este caso, siendo coherentes estos resultados con los obtenidos en los cálculos teóricos y las simulaciones.

De acuerdo con la tabla 10, se observa que la resistencia calefactora presentó una disminución en el consumo de energía del 16 % durante la primera hora y del 11 % durante la segunda hora, esto se debe a que después de la primera hora la temperatura es estable.

**Tabla 10.** Registro de energía con y sin aislante térmico

Energía [kW·h]	
Consumo de energía	[kW·h]
Con aislante	1,033
Sin aislante	1,200

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

La distribución de temperatura en la resistencia calefactora no es homogénea en su geometría; además, presenta una mayor concentración de calor en la parte central del perímetro y disminuye conforme se acerca a las terminales de conexión.

Los límites de temperatura en la resistencia calefactora en corriente alterna y corriente continua no presentaron una variación mayor al 2 % para cada nivel de tensión, lo que representa un comportamiento similar en corriente alterna y continua. También se debe tener presente que cuando se energiza en corriente continua el consumo de energía aumenta en un 23 % por causa del rectificador de señal.

Al someter la resistencia calefactora a un sistema de control *on-off* y PID, se comprobó que el control PID presenta mejores resultados en cuanto al consumo de energía eléctrica en un 22,03 %, reduce la amplitud de las oscilaciones en un 60 % y mantiene confiable el sistema, características que representan beneficios en la industria de los plásticos debido a los constantes daños en la materia prima por variaciones en la temperatura.

Se observó que la resistencia calefactora con el aislamiento térmico calculado apropiadamente mitiga el calor transferido a valores de temperatura que no representen riesgo laboral y además reduce el consumo de energía en un 16 % debido a que evita las pérdidas de calor por radiación.

## REFERENCIAS

- Arévalo, N. (2012). Panorama del sector de plásticos: Consumo. Recuperado de [www.clade2012.com/SalaB/50.pptx](http://www.clade2012.com/SalaB/50.pptx)
- Atecyr. (2007). Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. Recuperado de [http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/3Guia\\_3.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/3Guia_3.pdf)
- Corredor, M. (2010). Mercado de plásticos. *El sector del reciclaje en Bogotá y su Región: Oportunidades para los negocios Inclusivos* (pp. 28-29). Guías sectoriales de Fundes.
- Gaitan, L. (2004). La industria de los plásticos en Colombia, Guía Ambiental proceso básico para la transformación del plástico. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia\\_ambiental\\_proceso\\_basico\\_para\\_transf\\_plastico.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia_ambiental_proceso_basico_para_transf_plastico.pdf)
- Naranjo, A. (agosto, 2012). Ecoeficiencia en el uso de energía de la industria de los plásticos. *Tecnología del plástico*, 27, 16-20.
- Novoa, C. (s.f.). Utilización de la energía en los procesos, Guía Metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector: Plásticos. Recuperado de [http://209.217.236.222/~caemorg/catalogo/docs/600\\_GUIA\\_METODOLOGICA\\_PLASTICOS.pdf](http://209.217.236.222/~caemorg/catalogo/docs/600_GUIA_METODOLOGICA_PLASTICOS.pdf)
- Ogata, K. (1998). Reglas de sintonización para controladores PID. En K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna* (Trad. M. Sarmiento) (3ra edición) (pp. 670-676). Minnesota: Pearson Educación.