



AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES PARA LA GENERACIÓN DE ISOTERMAS EN UNA PLACA PLÁSTICA CALENTADA POR RADIACIÓN

Brenda Verónica Rangel Alcocer^a, Diego Iván González Gallegos^a, Paulo César López Maldonado^a,
Mario Alberto Rodríguez Angeles^{b,*}, Edilberto Murrieta Luna^a

^a Departamento de Ingeniería en Plásticos, Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Hidalgo 102,
Comunidad de Valencia, C.P. 38253 Juventino Rosas, Gto.

^b Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Hidalgo 102,
Comunidad de Valencia, C.P. 38253 Juventino Rosas, Gto. mrodriguez@upjr.edu.mx

Resumen

En el proceso de termoformado, la disposición de los elementos de calentamiento genera diversos perfiles de temperatura sobre la placa calentada. Cuando estos perfiles no son adaptados a la pieza formada, se puede producir un adelgazamiento excesivo de las paredes. Por lo tanto, mediante la compresión de la distribución de temperaturas, el proceso de termoformado puede ser mejorado para evitar problemas en la pieza. En este trabajo se presenta el estudio experimental de los perfiles de temperatura generados sobre una placa de acrílico por medio del calentamiento con una lámpara. Generando una malla con celdas cuadradas sobre la placa, se establecieron nodos de medición, donde se tomó la temperatura cada 5 minutos por un lapso de media hora. Para cada instante de medición, se utilizaron los valores de los nodos para trazar puntos de las isotermas cada 5 °C, entre 25°C y la temperatura máxima en los nodos. Los puntos fueron obtenidos usando una correlación lineal y posteriormente, una ajustada a la ecuación de transferencia de calor. Finalmente, se trazaron las isotermas utilizando un método de mínimos cuadrados para ajustarlas geoméricamente. Las curvas obtenidas mostraron un excelente ajuste a los datos obtenidos, ya que el valor de R^2 es muy cercano a 1.

Palabras clave: Termoformado, perfiles de temperatura, isotermas experimentales



ADJUSTMENT OF EXPERIMENTAL DATA FOR THE GENERATION OF ISOTHERMS IN A PLASTIC PLATE HEATED BY RADIATION

Abstract

In thermoforming process, the arrangement of the heating elements generates various temperature profiles on the heated plate. When these profiles are not adapted to the formed part, excessive thinning of the walls can occur. Therefore, by compressing the temperature distribution, the thermoforming process can be improved to avoid problems in the part. This work presents the experimental study of the temperature profiles generated on an acrylic plate by heating with a lamp. Generating a mesh with square cells on the plate, measurement nodes were established, where the temperature was taken every 5 minutes for a period of half an hour. For each measurement instant, the values of the nodes were used to plot isotherms points every 5 °C, between 25 °C and the maximum temperature at the nodes. The points were obtained using a linear correlation and then one fitted to the heat transfer equation. Finally, the isotherms were plotted using a least squares method to fit them geometrically. The curves obtained showed an excellent fit to the experimental data, since the value of R^2 is very close to 1.

Keywords: Thermoforming, Temperature profiles, experimental isotherm

1. Introducción

La transferencia de calor en placas planas es un proceso que ha sido ampliamente estudiado a través de los años, ya que forma las bases para varios sistemas industriales utilizados actualmente (Zhang y col., 2019, Rostami y col., 2022). En la industria de plásticos uno de los procesos que trabaja el calentamiento de placas es el termoformado, que consiste en el estiramiento diferencial de una lámina previamente calentada hasta su

punto de reblandecimiento. Uno de los principales problemas de este proceso es que, a medida que se estira, la placa se vuelve más delgada y como resultado la pieza final tiene un espesor de pared no uniforme (Throne, 2008).

Debido a que en la fase de formado de la pieza las zonas con mayor temperatura se pueden estirar más fácilmente que las demás, el proceso de calentamiento se vuelve una parte fundamental del proceso. Para mejorar el



acabado de las piezas elaboradas por termoformado, es necesario conocer con detalle el proceso, diversos autores señalan que se requiere conocer principalmente el rango de temperaturas en el que se debe manejar el material (Buffel y col., 2017) así como el cambio de sus propiedades con respecto a la temperatura (Patil y col., 2021) para poder obtener un calentamiento adecuado a la forma en que se va a realizar el formado de la pieza. Un mal calentamiento de las placas puede llevar a obtener piezas incompletas, deformes o, en el caso de geometrías complejas, la ruptura o desgarre del material (Kouba y col., 1992). Por otro lado, en la búsqueda de optimizar este proceso de calentamiento, se ha propuesto realizar el análisis de la forma en que viaja el calor por radiación desde el medio calefactor hasta la placa (Spateri y col., 2022), esto provee una forma de controlar tanto la intensidad como el tiempo en el que se realiza el proceso (Chy, 2013).

Con el estudio de todos los parámetros que involucra el calentamiento de la placa, se ha logrado la predicción y control del proceso, obteniendo mejores resultados en la pieza terminada. Sin embargo, uno de los retos más

grandes del termoformado sigue siendo la diferencia de grosor en las piezas ya que, dependiendo del método de moldeo, una pieza puede tener más gruesos los bordes o el fondo que el resto de las paredes. En el moldeo por soplo, otro método de transformación del plástico, también presentaba este mismo problema, el cual se ha logrado remediar realizando un calentamiento diferencial en la probeta (Bordival, 2009). Considerando que la base de ambos procesos es en esencia la misma, es posible mejorar la homogeneidad del grosor en las piezas por este mismo método (Pereira y col., 2007).

Realizar un calentamiento diferencial en una placa para adaptarlo al formado es un tanto más complejo en el termoformado ya que, a diferencia del moldeo por soplo, las piezas suelen tener una mayor variabilidad en cuanto a sus geometrías. Para realizar los estudios de calentamiento diferencial, se han utilizado principalmente modelos basados en elemento finito (Buffel y Desplentere, 2023), generando simulaciones numéricas que permiten observar tanto los perfiles de temperatura durante el calentamiento (Dastidar, 2022), como el resultado de la



aplicación de los esfuerzos sobre la placa calentada (Wagner y col., 2022).

Para probar los modelos utilizados en las simulaciones, es necesario comparar sus resultados con los experimentales. Este procedimiento implica generar puntos de medición de temperatura en la simulación y se comparan con el mismo lugar geométrico en la placa experimental. Una forma más práctica de realizar esta comparación es generar curvas isotérmicas a partir de los datos experimentales para compararlas con las generadas por el simulador. Este método puede ser especialmente útil cuando se trata de simulaciones por elemento finito o por CFD. En este trabajo se presenta una metodología para la generación de las curvas isotérmicas o isothermas a partir de datos experimentales, con las cuales se elaboran perfiles de temperatura para el calentamiento de una placa de acrílico.

2. Metodología

El presente trabajo se llevó a cabo en 2 etapas: la obtención de datos experimentales mediante la medición de temperaturas sobre un arreglo experimental y el ajuste de estos

datos para la generación de las isothermas utilizando modelos matemáticos.

2.1. Arreglo Experimental

El arreglo experimental utilizado para este trabajo puede apreciarse en la Figura 1, el arreglo fue colocado en un lugar errado para evitar la existencia de corrientes de aire.

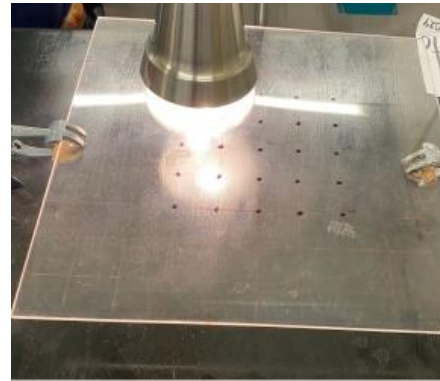


Figura 1. Arreglo experimental.

Como objeto de prueba, se utilizó una placa plana de acrílico con dimensiones de 40 x 40 cm, la cual se fijó utilizando tres soportes universales a una mesa de laboratorio, teniendo una separación vertical de 6 cm entre la placa y la mesa. Se aseguró que la mesa estuviera nivelada y que la posición de la placa fuera perfectamente paralela a la mesa. Sobre la placa de acrílico se dibujó, de forma centrada, una malla compuesta de 16 elementos cuadrados de 4 x 4 cm, donde se



marcaron 25 nodos equidistantes en los cuales se realizaron las mediciones de temperatura. Como medio de calentamiento se utilizó una lámpara marca YL equipada con un foco incandescente de 40W marca Alefco sobre la esquina superior izquierda de la placa, a una distancia vertical de 1.5 cm de altura. En la Figura 2 se muestra un esquema de la placa, la zona sombreada representa la malla.

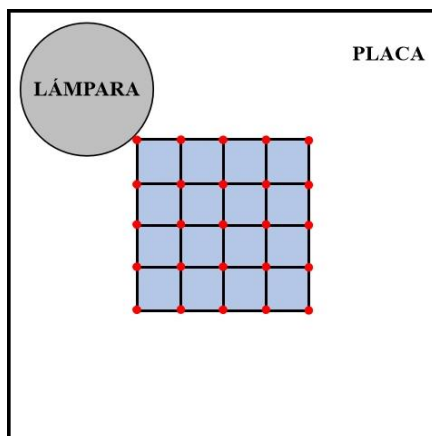


Figura 2. Diagrama representativo de las zonas en la placa.

2.2. Toma de datos

Se tomó inicialmente la temperatura ambiental y de la placa en varios puntos para verificar condiciones iniciales de temperatura homogéneas. También se tomó lectura de la

temperatura de la mesa de trabajo y la cantidad de radiación real emitida por la lámpara previo al experimento. La lámpara fue encendida y, a partir de este momento, se tomaron lecturas de temperatura en cada uno de los nodos de la placa de acrílico utilizando un termómetro infrarrojo digital. Estas lecturas fueron realizadas cada 5 minutos durante el lapso de total de 30 minutos. También se tomaron temperaturas ambientales alrededor de la placa para observar el cambio de la temperatura con respecto al tiempo y determinar su influencia durante el proceso.

2.3. Ajuste de datos

Los datos obtenidos por medio del desarrollo experimental fueron analizados y ordenados. Con ello, se calcularon los lugares geométricos por donde pasarían las isotermas para generar los perfiles de temperatura del calentamiento de la placa.

Se generaron isotermas para un rango desde 25°C hasta la temperatura más alta registrada en la placa cada vez, con intervalos de 5°C. Para elaborar estas, se identificaron los nodos entre los cuales pasa la isoterma, según el



valor de las temperaturas registradas en los nodos. Para dos nodos consecutivos, se calculó la distancia del punto entre ellos por el cual pasa la isoterma. Este cálculo fue llevado a cabo por 2 métodos diferentes, siendo el primero por interpolación y el segundo, una propia de modelo basado en la ecuación de Fourier. Los puntos obtenidos representan una dispersión de la función de las temperaturas, es posible representar las isotermas como una línea suavizada que pasa a través de todos los puntos. Por otro lado, para su comparación con las ecuaciones de transferencia de calor o con simulaciones, resulta más ilustrativo realizar un ajuste de los puntos a una línea de tendencia. Este ajuste se realizó utilizando el método de mínimos cuadrados, obteniendo finalmente las isotermas ajustadas y el perfil de temperaturas en la placa para cada momento.

3. Generación de isotermas

3.1. Cálculo de puntos de la isoterma por interpolación

El primer método para encontrar los puntos para las isotermas fue una interpolación simple entre los nodos vecinos. Es bien

conocido que una interpolación sólo es válida cuando se trata de una función polinómica de primer orden, es decir una función lineal, sin embargo, también se conoce que, si los puntos utilizados para la interpolación son lo suficientemente cercanos, se puede obtener un valor aproximado para el punto buscado con una precisión aceptable.

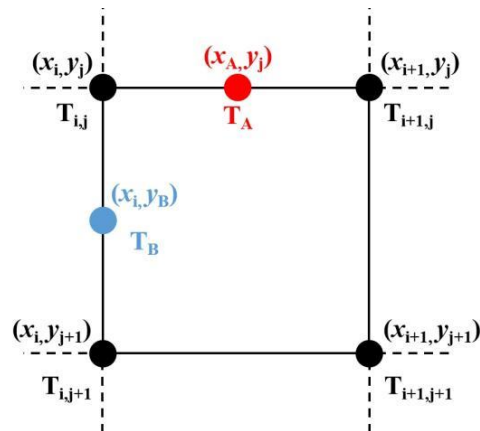


Figura 3. Esquema de una celda con sus nodos de medición

En la Figura 3 se muestra un esquema representativo de una celda y los valores utilizados para realizar una interpolación entre 2 nodos consecutivos. Las variables x , y representan las coordenadas de los nodos, mientras que T representa sus temperaturas. Los subíndices i y j representan la posición del nodo, tomando en cuenta el esquema de la Figura 2 donde la lámpara se encuentra en la esquina superior izquierda de la malla, el



nodo (i, j) sería el más cercano a la lámpara y por lo tanto el que presenta la mayor temperatura entre los 4 nodos de la celda. Suponiendo que una de las isothermas pase por el punto A mostrado en rojo, se conocerán las temperaturas $T_{i,j}$ y $T_{i+1,j}$, además de la temperatura de la isoterma con la que se está trabajando T_A y la coordenada en y, ya que el punto A es colineal horizontalmente a los otros dos y por lo tanto su valor y_i no cambia. De esta forma, la incógnita a resolver es la coordenada x_A por donde pasa la isoterma, la cual puede calcularse por interpolación como:

$$x_A = x_i - \frac{(T_{i,j} - T_A)}{(T_{i,j} - T_{i+1,j})} (x_i - x_{i+1}) \quad (1)$$

De la misma manera, si ahora la isoterma pasa por el punto B mostrado en azul, la coordenada y_B se puede obtener como:

$$y_B = y_j - \frac{(T_{i,j} - T_B)}{(T_{i,j} - T_{i,j+1})} (y_j - y_{j+1}) \quad (2)$$

3.2. Cálculo por transferencia de calor

Para utilizar un modelo de transferencia de calor se debe determinar primero el mecanismo que gobierna el proceso. Se conoce que la placa está siendo calentada por la radiación proveniente de la lámpara (Q_r), y

al mismo tiempo se enfría debido a la convección natural (Q_h). Además, cada nodo recibe calor de otras secciones de la placa por conducción (Q_{ke}) y lo transfiere de la misma forma (Q_{ks}). Un esquema simplificado de este proceso se muestra en la Figura 4.

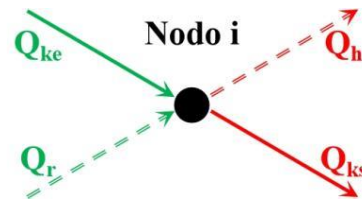


Figura 4. Transferencia de energía en un nodo

El balance de energía para el nodo i es entonces:

$$Q_{ke} + Q_r = Q_{ks} + Q_h \quad (3)$$

Generar un modelo de transferencia de calor considerando todos los efectos resulta complicado y se tendría que utilizar métodos numéricos para resolverlos, y aun así los resultados contienen un grado de error. Para reducir la complejidad de la ecuación a utilizar, por lo tanto, se hacen las siguientes consideraciones:

- La radiación directa de la lámpara no incide sobre la zona de medición y la radiación indirecta es muy pequeña.



- Debido a la baja conductividad térmica de la placa, solo una pequeña zona cerca de la lámpara tendrá una temperatura lo suficientemente alta para considerar la convección.
- La conducción en la placa es radial a partir de los bordes de la lámpara.
- Tanto el grosor de la placa como su difusividad térmica son constantes.

Debido a esto, se puede considerar que la transferencia de calor en los nodos se da en su mayoría por conducción, pudiendo despreciar la radiación y la convección, sobre todo en los nodos lejanos a la lámpara. De esta forma, la temperatura debería entonces seguir una función logarítmica, dada la forma de la ecuación de Fourier para coordenadas cilíndricas:

$$Q = 2\pi kL \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

Y las isoterma en la zona medida deben ser círculos concéntricos a la lámpara, como se muestra en la Figura 5.

Para calcular el lugar geométrico de las isoterma, se utilizó el esquema mostrado en la Figura 6, en donde se considera que por

cada nodo de la malla pasa una isoterma con un valor igual al del nodo (T_1 y T_2) cuyos radios son r_1 y r_2 , medidos desde el centro de la lámpara. De igual forma, la isoterma buscada con temperatura T y radio r , pasa por un punto intermedio entre los otros dos.

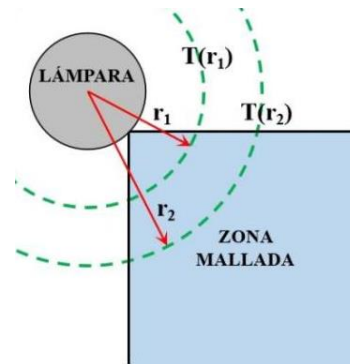


Figura 5. Transferencia de calor en la zona mallada

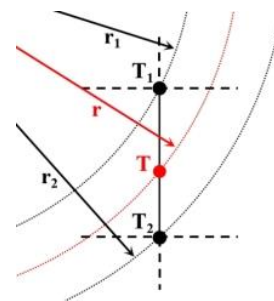


Figura 6. Isotherma sobre los nodos de medición

Reacomodando la Ecuación 4 y considerando que, para un instante dado, el calor que pasa del nodo 1 al intermedio y de este al 2 es constante e igual, se obtiene que:



$$\frac{T_1 - T}{\ln(r/r_1)} = \frac{Q}{2\pi kL} = \frac{T - T_2}{\ln(r_2/r)} \quad (5)$$

Al eliminar los logaritmos se tiene:

$$\left(\frac{r}{r_1}\right)^{(T-T_2)} = \left(\frac{r_2}{r}\right)^{(T_1-T)} \quad (6)$$

Para finalmente obtener una expresión para r:

$$r = \left[r_1^{(T-T_2)} r_2^{(T_1-T)} \right]^{\left(\frac{1}{T_1-T_2}\right)} \quad (7)$$

Las coordenadas (x, y) para el punto marcado en rojo se calculan por el teorema de Pitágoras, considerando que, para puntos colineales horizontales, se busca la coordenada y, mientras que para puntos verticales se busca la coordenada x.

3.3. Ajuste de las isothermas

Para generar finalmente las isothermas ajustadas, se tomó en cuenta que las funciones eran circulares, por lo tanto, utilizando el método de mínimos cuadrados, se encontró el radio del círculo que corresponde a cada isoterma.

Teniendo tanto los radios como las coordenadas (x, y) a partir del centro de la lámpara, se utiliza la función del círculo:

$$y^2 = r^2 - x^2 \quad (8)$$

Según el método de mínimos cuadrados (Spiegel y Stephens, 2020), se representa cada término como una sumatoria:

$$\sum y^2 = \sum r^2 - \sum x^2 \quad (9)$$

Dado que r es la única constante a calcular, basta con esta ecuación para obtenerla, de tal forma que al despejarla se tiene:

$$r = \sqrt{\frac{\sum x^2 + \sum y^2}{n}} \quad (10)$$

El cual puede utilizarse para calcular las funciones circulares que representan las isothermas ajustadas.

4. Resultados

Según las mediciones realizadas, la temperatura inicial de la placa de acrílico fue de 20.3°C, mientras que la del ambiente que la rodeaba era de 26.1°C y la de la mesa de trabajo de 20.1°C. La energía incidente de la



lámpara medida fue de 1083 W/m^2 y en cuanto se encendió, la temperatura de la zona de incidencia directa aumentó rápidamente, de tal forma que la temperatura del nodo de medición más cercano a ella aumentó a casi 60°C después de los primeros 5 minutos. Por otro lado, los nodos adyacentes a este solo alcanzaron alrededor de 27°C en el mismo periodo de tiempo, lo cual muestra la baja velocidad de la transferencia de calor entre los nodos. De hecho, los nodos más alejados de la lámpara, solo aumentaron alrededor 1°C después de los 30 minutos del experimento. En estos nodos la transferencia de calor por convección al ambiente es prácticamente nula debido a la baja diferencia de temperaturas.

Se tomaron un total de 150 datos de temperatura durante el experimento, sin embargo, para una mejor comprensión de la aplicación de los métodos expuestos, se analizará en extenso solo un caso, correspondiente a los datos tomados en el minuto 30.

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas en $^\circ\text{C}$ obtenidas en cada nodo de medición de la malla, estos nodos se numerarán de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, de tal forma

que el nodo con $T = 74.1^\circ\text{C}$ sería el nodo 1, siguiendo hacia la derecha donde $T = 43.0^\circ\text{C}$ que sería el nodo 2, y así sucesivamente hasta llegar al nodo inferior derecho que sería el 25.

Tabla 1. Temperaturas de los nodos a los 30 min.

74.1	43.0	27.0	22.1	21.6
42.2	30.4	25.1	22.9	21.7
26.3	24.9	23.5	21.9	21.6
22.7	22.5	22.1	21.6	21.6
21.5	21.5	21.4	21.4	21.4

Inicialmente, para calcular la región geométrica de la isoterma de 25°C , se establecen primero los pares de nodos entre los cuales pasa esta. Por ejemplo, dado que en el nodo 3 $T = 27.0^\circ\text{C}$ y en el nodo 4 $T = 22.1^\circ\text{C}$, se tiene que debe existir un punto entre estos dos nodos donde la temperatura es de 25°C . Lo mismo sucede entre los nodos 8-9, 8-13, 7-12, 11-12 y 11-16, un total de 6 pares de nodos.

Al utilizar los métodos de las secciones 3.1 y 3.2, se obtuvieron 6 puntos en cada uno cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 2.



Tabla 2. Coordenadas en cm de los puntos obtenidas por los métodos propuestos.

Punto	Interp.		Ec. Transf.	
	x	y	x	y
1	0.00	9.44	0.00	9.35
2	3.71	8.00	3.75	8.00
3	4.00	7.93	4.00	7.92
4	8.00	4.25	8.00	4.26
5	8.18	4.00	8.17	4.00
6	9.63	0.00	9.53	0.00

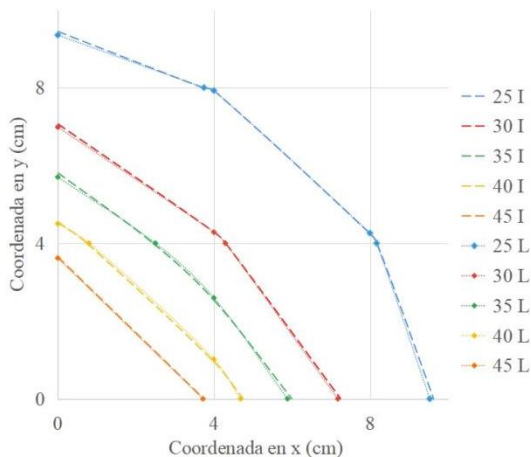


Figura 7. Puntos de las isothermas calculados por interpolación (I) y la ec. de transferencia (L)

Se puede observar que las coordenadas obtenidas por ambos métodos son muy cercanas, de hecho, si se grafican, prácticamente se superponen. En la Figura 7 se muestran los puntos obtenidos por ambos

métodos para las isothermas desde 25°C hasta los 45°C. Se puede apreciar que, para todas las isothermas, la diferencia entre las coordenadas de los puntos es mínima.

Después de ajustar los puntos obtenidos por ambos métodos con las ecuaciones de mínimos cuadrados, se generaron las isothermas circulares para cada instante de muestreo. En la Figura 8 se muestran las isothermas generadas a partir de los puntos generados por interpolación.

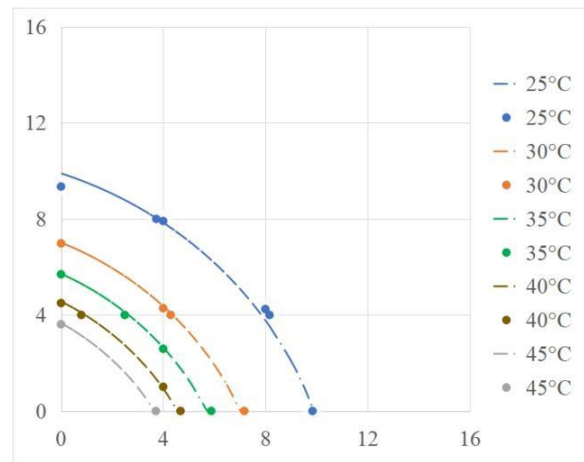


Figura 8. Ajuste de las isothermas a los puntos

Se puede observar que se tiene un excelente ajuste entre los puntos experimentales y las curvas generadas. Para los datos generados a partir de la ecuación de transferencia de calor, el comportamiento es similar. Por ejemplo, para la isoterma de 25°C se obtuvo un círculo



de 16.02 cm de diámetro con un coeficiente de determinación de 0.9809 usando los datos interpolados mientras que para los datos por la ecuación de transferencia se obtuvo un radio de 15.99 cm con un coeficiente de determinación de 0.9736. Para todas las demás curvas se obtuvieron coeficientes de determinación superiores a 0.99.

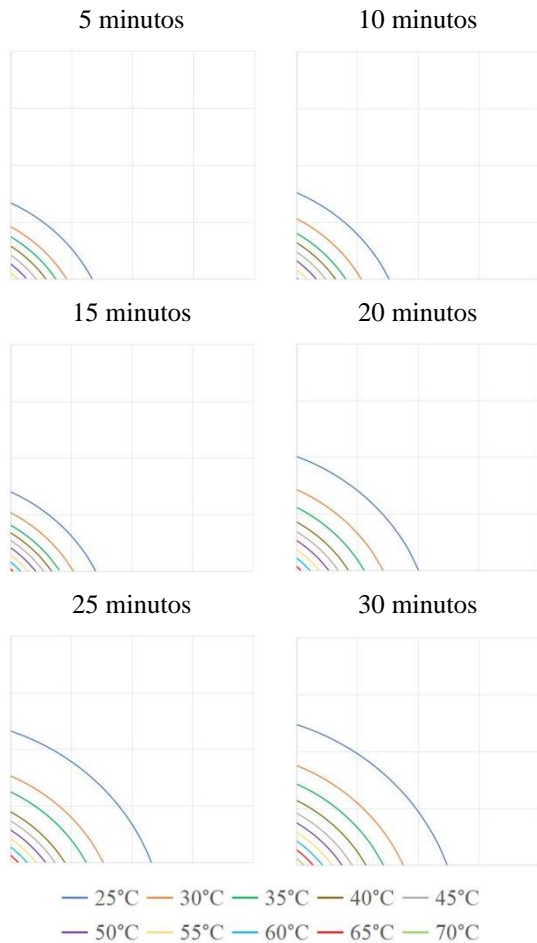


Figura 9. Perfiles de temperatura en la placa

En la Figura 9 se muestran los perfiles de temperatura completos para cada instante de medición.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para elaborar curvas isotérmicas a partir de datos experimentales para el calentamiento de una placa de acrílico por radiación. Los puntos generados para las isothermas utilizando los métodos de interpolación y de transferencia de calor coincidieron casi perfectamente, lo que sucedió debido a la cercanía de los nodos de medición. Sin embargo, debido a las bases matemáticas del método de interpolación, es muy probable que mientras más separados estén los nodos, mayor será la diferencia de resultados con respecto al método basado en la transferencia de calor, siendo esta último el más preciso. Las consideraciones realizadas para el modelo de transferencia de calor fueron correctas, dadas las observaciones realizadas al ajustar los datos. Las curvas de las isothermas ajustaron de excelente forma a los puntos calculados, por lo que se concluye que el ajuste a círculos concéntricos con el origen en el centro de la lámpara fue una elección



correcta. Aunque se deberá ampliar esta metodología con otras posiciones y formas de la lámpara, se espera que esta pueda ayudar a facilitar la comparación entre las isotermas experimentales con las obtenidas a través de simulaciones.

Referencias bibliográficas

- Bordival, M., Schmidt, F.M., Le Maoult, Y. y Velay, V. Optimization of preform temperature distribution for the stretch-blow molding of pet bottles: Infrared heating and blowing modeling. *Polymer Engineering and Science*, 49(4), 783-793. <https://doi.org/10.1002/pen.21296>
- Buffel, B. y Desplentere, F. (2023). Optimized sheet temperature distribution for thermoforming. *AIP Conference Proceedings*, 2607(1), 100001. <https://doi.org/10.1063/5.0137381>
- Buffel, B., van Mieghem, B., van Bael, A. y Desplentere, F. (2017). A combined experimental and modelling approach towards an optimized heating strategy in thermoforming of thermoplastics sheets. *International Polymer Processing*, 32(3), 378-386. <https://doi.org/10.3139/217.3370>
- Chy, M.I. (2013). *Estimation and control of plastic temperature in heating phase of thermoforming process* [Tesis de doctorado, McGill University].
- Dastidar, A.G., (2022). *Modeling and simulation of thermoforming* [Tesis de doctorado, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai]
- Kouba, K., Bartos, O. y Vlachopoulos, J. (1992) Computer simulation of thermoforming in complex shapes. *Polymer Engineering Science*, 32(10), 699-704. <https://doi.org/10.1002/pen.760321009>
- Patil, J.P., Nandedkar, V., Mishra, S. y Saha, S.K. (2021). Transient thermal analysis of close pressure thermoforming process. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 513-522. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.057>
- Pereira, D.C., Duarte, F.M. y Covas, J.A. (2007). Using differential heating to improve the thickness distribution of parts produced by plug assisted thermoforming. *Proceedings*



of *The Polymer Processing Society 23rd Annual Meeting*, 1-7.

Rostami, S., Hamid, S. A., Sopian, K., Jarimi, H., Bassim, A. y Ibrahim, A. (2022). Heat transfer analysis of the flat plate solar thermal collectors with elliptical and circular serpentine tubes. *Applied Sciences*, 12(9), 4519. <https://doi.org/10.3390/app12094519>

Spateri, E., Ruiz, F. y Gruosso, G. (2022). Modelling and analysis of radiation heating in thermoforming processes. *Proceedings of 21st Mediterranean Electrotechnical Conference*, 249-254. <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842929>

Spiegel, M. R. y Stephens, L.J. (2020). *Estadística*. McGraw Hill.

Throne, J. L. (2008). *Understanding Thermoforming*. Hanser.

Wagner, S., Kayatz, F., Münsch, M., Sanjon, C.W., Hauptmann, M. y Delgado, A. (2022). Numerical modeling of forming air impact thermoforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 4917–4933. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08944-4>

Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E. y Haglind, F. (2019). A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 305-328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.017>