

Homogenización de la Dureza en Lámina de Acrílico mediante la Optimización del Proceso de Post-curado

Ing. Claudio Arian Moreno Serna¹, Dr. Ernesto Chavero Navarrete²

Resumen—La lámina de acrílico es un plástico que se obtiene por la polimerización catalizada del monómero de metil metacrilato. Una de sus principales características es la resistencia al impacto (dureza). La dureza es controlada en la polimerización final (post-curado). Una deficiente homogenización de la temperatura al interior del horno genera diferentes valores de dureza a lo largo de la lámina. En PLASTIGLAS de México para optimizar el proceso de post-curado, se implementó una metodología para el control de temperatura en cada zona de calentamiento, se realizó un análisis de la conservación de temperatura, se determinó la reubicación de turbinas de recirculación de aire en zonas específicas y se automatizó la cadena de arrastre del producto. Como resultado se incrementó la homogenización de la dureza de la lámina en un 9.7% en zonas con deficiencia. Con esto se aseguraron las especificaciones requeridas y se minimizaron las pérdidas por producción defectuosa.

Palabras clave—Ingeniería y tecnología, tecnología de materiales, plásticos, lámina de acrílico, dureza

Introducción

El proceso de fabricación de una lámina acrílica conlleva las siguientes etapas: 1) Calentamiento, 2) Mezclado, 3) Coloración, 4) Inyección en moldes de vidrio templados y 5) polimerización final en piscinas y hornos a temperatura controlada (Babo et al. 2020). El control y la automatización de todas las fases del proceso involucradas es crucial para obtener las especificaciones de fabricación requeridas. Plastiglas de México S.A de C.V. es una empresa líder en norte América de la fabricación de lámina acrílica (cell-cast). En su planta ubicada en San Luis Potosí, México, se fabrican alrededor de 6000 toneladas anuales de lámina de acrílico (PLASTIGLAS, 2022). El principal problema en la fabricación de esta lamina es la homogeneidad de la dureza en toda la superficie de la lámina. La dureza de la lámina se genera en el proceso de post-curado en un horno de convección, el horno se divide en 10 zonas de diferentes temperaturas, de las cuales 8 zonas son de calentamiento y 2 zonas son de enfriamiento, en cada una de las zonas se ingresan estructuras con 15 moldes (Garcia, 2016). La Figura 1, muestra la configuración del horno de convección descrito.

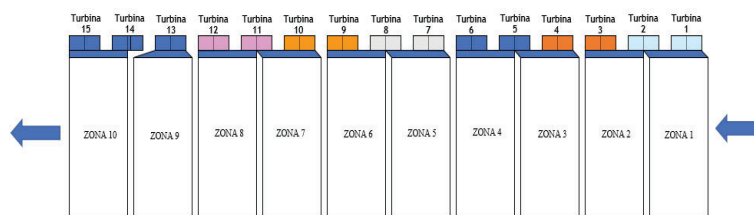


Figura 1. Distribución del horno de post-curado.

En algunas zonas se detecta un calentamiento diferente dentro del horno, cuando la dureza en un extremo de la lámina cumple con la especificación, está en el lado caliente del horno. Si la lámina no cumple con la dureza especificada es porque la parte de la lámina está en el lado frío del horno. El diferencial de temperatura en el perfil de post-curado entre el lado caliente y el lado frío genera láminas con diferentes propiedades fisicoquímicas afectando principalmente a la temperatura de Deflexión al Calor. Este efecto se muestra en la lámina de la Figura 2.

¹ Ing. Claudio Arian Moreno Serna. Posgrado CIATEQ AC, Centro de Tecnología Avanzada, <https://orcid.org/000-0003-3245-8406>, Email: claudio.moreno@plastiglas.com.mx (autor correspondiente).

² Dr. Ernesto Chavero Navarrete, CIATEQ AC, Centro de Tecnología Avanzada, <https://orcid.org/0000-0002-3648-3839>, Email: ernesto.chavero@ciateq.mx



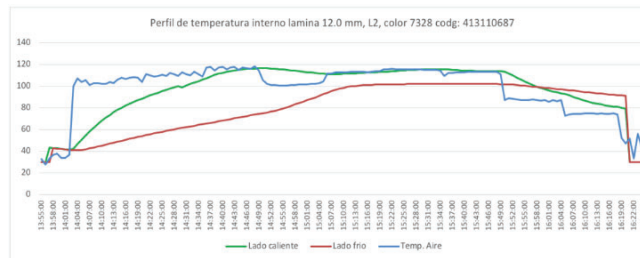
Figura 2. Deformación de la lámina con la exposición al calor.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, el propósito de este trabajo es determinar las razones por las cuales no se logra la homogenización de la dureza en la lámina. Como resultado del análisis, se rediseñaron dos zonas de calentamiento que permitieron una dureza uniforme en toda la lámina y con el software SuperCEP (Oviedo-Velázquez, 2016), se analizó la capacidad del proceso para validar los resultados. Se optimizó el control de temperatura apoyándonos con el software Matlab/Simulink (MathWorks, 2018) y se automatizó la estancia del material dentro del horno en la fase de post-curado mediante el avance de la cadena interna del horno utilizando el software RSLogix 500 (Rockwell Automation, 2020).

Descripción del Método

Análisis del proceso de post-curado

En un horno de convección el aire se calienta y es recirculado dentro del mismo horno (García,2016). La inyección del aire caliente dentro del horno es del extremo derecho (lado caliente) y la extracción es por el lado izquierdo (lado frío). Esta configuración provoca diferentes valores de dureza en una misma lámina. Se realizó un análisis de la temperatura interna de la lámina dentro del horno de post-curado, se requiere de 105°C entre 30 y 60 minutos para generar una dureza dentro de especificación. La Figura 3, muestra que este requerimiento no se cumple en el lado frío de la lámina.



Tiempo lado caliente arriba de 105°C = 62 min
Tiempo lado frio arriba de 105°C = 0 min

Figura 3. Temperatura interna de una lámina de 12.0 mm.

De igual manera se realizó un análisis de la dureza en la superficie de la lámina de acrílico, donde la dureza requerida es de 90 HRM (Escala Rockwell) como mínimo. La Figura 4, muestra los resultados del análisis de dureza, en a) el lado caliente oscila entre 94.5 y 100.5 HRM y en b) el lado frio oscila entre 88.7 y 94.4 HRM.

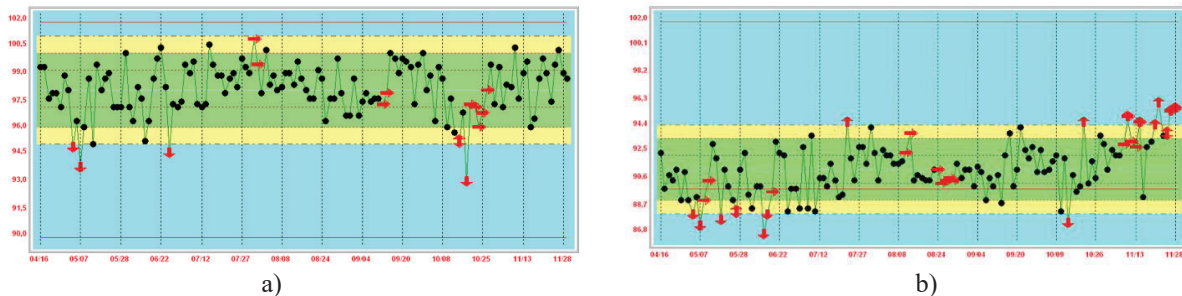


Figura 4. Análisis de dureza. a) Lado caliente y b) Lado frio.

La transferencia de calor se lleva a cabo con la circulación de vapor a través de intercambiadores de calor en cada zona, 2 intercambiadores por zona. La Figura 5, muestra el diseño del horno, en a) se muestra las zonas de calentamiento y enfriamiento y como es el flujo del aire, entra por un extremo del horno (lado caliente) y sale por el

otro extremo del horno (lado frío), en b) se muestra el detalle de la inyección del aire al interior del horno por el lado caliente. La pared del horno cuenta con unas rejillas que direccionan el aire para cubrir la mayor cantidad de volumen posible al interior del horno.

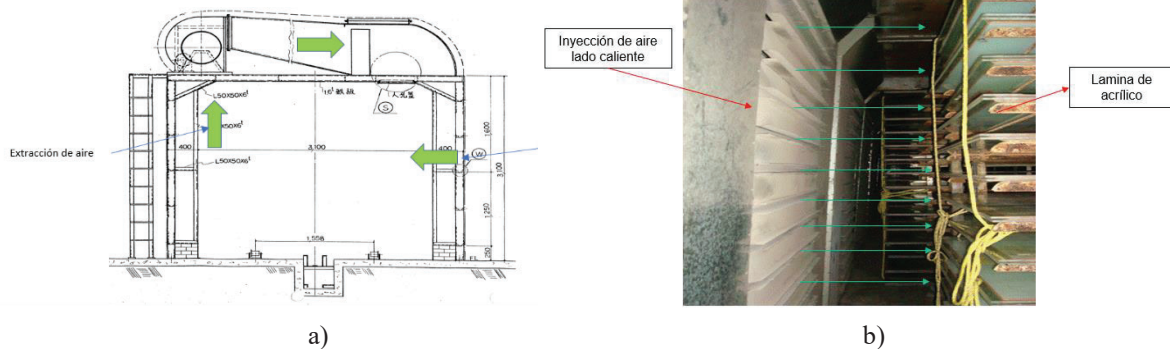


Figura 5. Configuración del horno de convección. a) Flujo del aire al interior, b) Inyección de aire caliente.

De acuerdo con el análisis realizado se encontró que el tiempo de avance de la cadena de arrastre al interior del horno cambia en cada lote de producción, debido a que este tiempo depende de los operadores a la salida del horno. Esta variabilidad impacta directamente la temperatura interna del producto en la fase de post-curado y como consecuencia a la dureza de la lámina.

Otro aspecto crítico encontrado en el análisis del proceso de post-curado es que los lazos de control de temperatura de las zonas de calentamiento necesitan mejorar su estabilidad. En cada zona del horno, el tiempo en el que se alcanza la temperatura de consigna no es el mismo en cada zona, por tanto, la temperatura no permanece constante y se tiene una variabilidad de temperatura a lo largo del horno. Esto ocasiona que cuando el lote de láminas acrílicas transita a lo largo del horno, la lámina es expuesta a cambios de temperatura que afecta la homogeneidad del calentamiento y por consecuencia se tiene un impacto negativo en sus propiedades físicas como la dureza.

Reconfiguración del horno de convección

Una vez realizado el análisis de la inestabilidad de la temperatura a lo largo del horno de post-curado, se concluye que con la configuración actual no es posible cumplir con el perfil de temperatura interno de la lámina durante el proceso por lo que se plantea intercambiar el flujo el aire caliente en dos zonas de calentamiento del horno, es decir, ahora el aire caliente entrara por al lado frío de la lámina. Se seleccionaron las zonas de calentamiento 5 y 6 para hacer el cambio del flujo de aire ya que son zonas intermedias en la etapa de calentamiento. Igualmente, se modificó el diseño al interior del horno en las zonas 5 y 6, se acercaron las mamparas de inyección de aire caliente para que estén más cerca a la lámina de acrílico. Con esto, se pretende tener un mejor control en la temperatura interna del producto, ya que mientras menor sea la distancia entre la salida del aire caliente a temperatura controlada, menor son las pérdidas ocasionadas por el intercambio de calor con la temperatura al interior del horno. En la Figura 6, se muestran el trabajo realizado en la reconfiguración del horno de convección.



Figura 6. Reconfiguración del horno de convección. a) Modificación en la posición de las turbinas.
b) Modificaciones al Interior del horno.

Sincronización del avance de la lámina en el horno

Esta automatización tiene como objetivo sincronizar la velocidad de avance del producto con la temperatura al interior del horno y la apertura y cierre de las puertas de entrada, intermedia y de salida del horno, de tal manera que la lámina de acrílico cumpla su perfil de calentamiento interno y se logren las especificaciones físicas deseadas. El tiempo de proceso que se tenía inicialmente fue de 12 minutos por zona. Después de realizar varias pruebas se obtuvo un tiempo por cada una de las 8 zonas de calentamiento y dos de enfriamiento de 13.3 minutos. El avance del material de zona a zona se realiza por un tiempo de 69 segundos, con este tiempo el material queda al centro de cada zona de calentamiento y el aire caliente se distribuye con mayor eficiencia. Se uso el PLC MicroLogix 1500 (Pawar, 2016).

En la Figura 7, se muestra el perfil de temperatura que se obtuvo antes y después de realizar la automatización de la cadena de arrastre de producto al interior del horno.

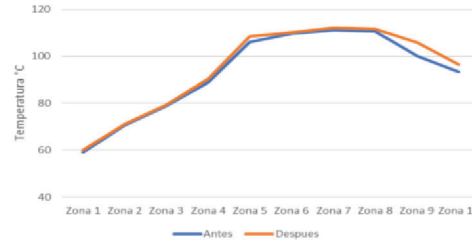


Figura 7. Perfil de temperatura modificando el tiempo de arrastre.

Control de temperatura del horno de convección

Para la optimización de la sintonía de los lazos de control de temperatura de las zonas de calentamiento del horno de post-curado se utilizó el software Matlab/Simulink (MathWorks, 2018), para tener el modelo dinámico de la planta tomando como referencia datos experimentales. Se realizó un procedimiento con la herramienta System Identification Toolbox para obtener el modelo de la planta tanto para las zonas modificadas 5 y 6 como para el resto de las zonas. Se obtuvo como mejor aproximación para el calentamiento del horno un modelo representado con una ecuación de primer orden con retardo (Lipták, 2006).

La función de transferencia del modelo matemático de primer orden con retardo que modela el comportamiento de la temperatura se define como:

$$G(S) = \frac{K_p}{1+T_i S} * e^{-T_d S} \tag{1}$$

donde las variables Kp, Ti y Td son las ganancias de un controlador PID (Ogata, 2010).

Para la sintonización de las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador se realizó una aproximación de los valores con la librería PID Tuner del software Matlab. Se obtienen las ganancias con la mejor respuesta a una entrada escalón son: proporcional Kp = 0.47648, ganancia integral Ti = 0.35187 y ganancia derivativa Td= 0. El comportamiento de la temperatura con los datos experimentales y con la ecuación obtenida excitada con una señal de entrada con un impulso escalón se muestra en la Figura 8 a), en b) se tiene la respuesta del modelo matemático al controlador a una entrada de excitación tipo escalón, en este caso es del tipo Proporcional + Integral (PI) debido a que la ganancia obtenida para el modo derivativo fue cero (Nice, 2011).

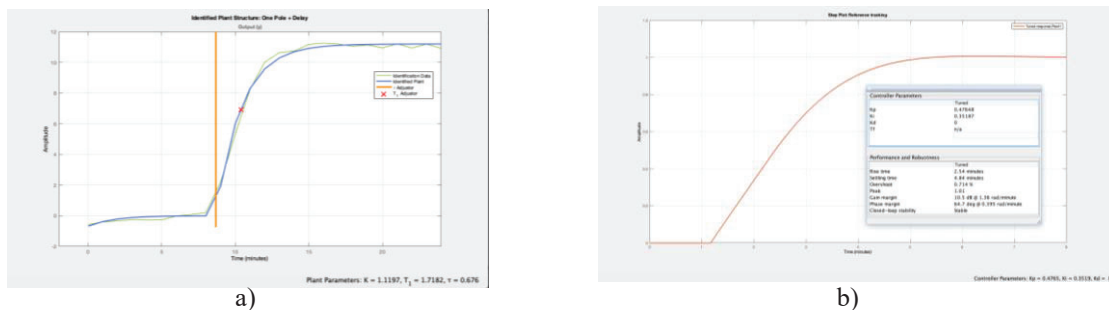


Figura 8. Respuesta del modelo matemático propuesto. a) Planta de primer orden con retardo, b) Controlador con entrada escalón.

Resultados

Como resultado de la reconfiguración del horno de post-curado en las zonas 5 y 6, en una primera prueba se logró obtener el perfil de temperatura interna de la lámina. En la Figura 9, en a) se observa que al llegar el producto a la zona 5 comienza a incrementar la temperatura del lado frío (línea roja) en forma más acelerada logrando llegar a 105°C durante un periodo de tiempo de 42 min. En b) se muestra el resultado de perfil de temperatura interna de la lámina de una segunda prueba de validación, esta vez después de realizar la sincronización del avance de la cadena y la optimización del control de temperatura de las zonas de calentamiento, también se decidió modificar el set point de las diferentes zonas de calentamiento y validar si la metodología era aplicable en otra temperatura. Los sets point propuestos fueron: Zona 1 – 2 = 112°C, Zona 3 – 4 = 115°C, Zona 5- 6 = 118°C y Zona 7 – 8 = 112°C. Se observa que el tiempo a 105°C en el interior de la lámina se conserva, incluso con un ligero incremento. El lado frío incrementa de 42 a 48 minutos con una temperatura de 105°C o mayor, y el lado caliente incrementa de 62 a 89 minutos arriba de 105°C, comprándolo con el perfil solo con la reconfiguración del horno.

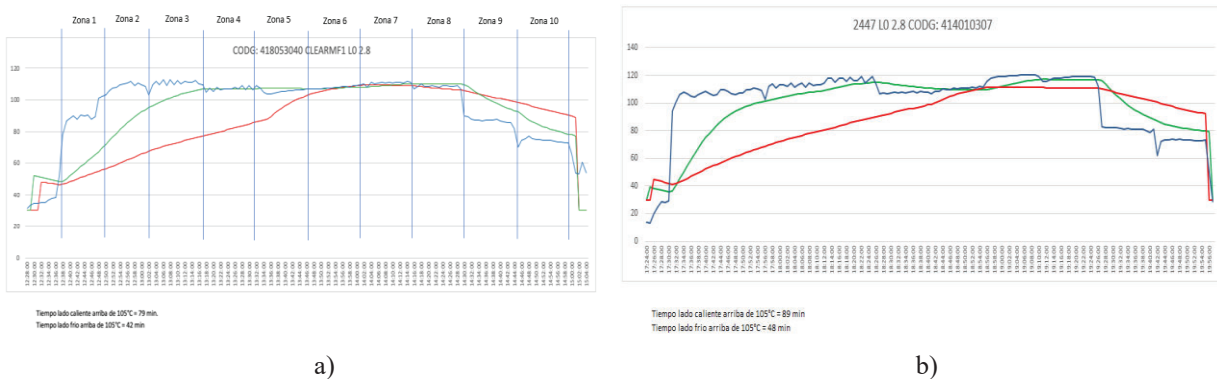


Figura 9. Resultado del comportamiento de la temperatura en el horno de post-curado. a) Perfil de temperatura después de la reconfiguración del horno, b) Perfil de temperatura después de la sincronización de la cadena y optimización de PID.

Para validar los resultados obtenidos, se presenta la Figura 10. En a) se demuestra la homogeneidad de la dureza en toda la superficie de la lámina de acrílico a partir de 2019. Se pudo observar que, en todos los casos, la dureza de la lámina tanto en el lado frío como en el lado caliente conserva valores similares, cumpliendo así con las especificaciones requeridas por el cliente. Para validar los resultados de dureza para las láminas acrílicas, se utilizó el software de control estadístico de procesos SuperCEP (Oviedo-Velazquez, 2016). En b) se indica la capacidad del proceso después de los cambios realizados, de una muestra de 123 datos de obtiene una media de 97.79 HRM con una habilidad del proceso de CpK = 1.49.

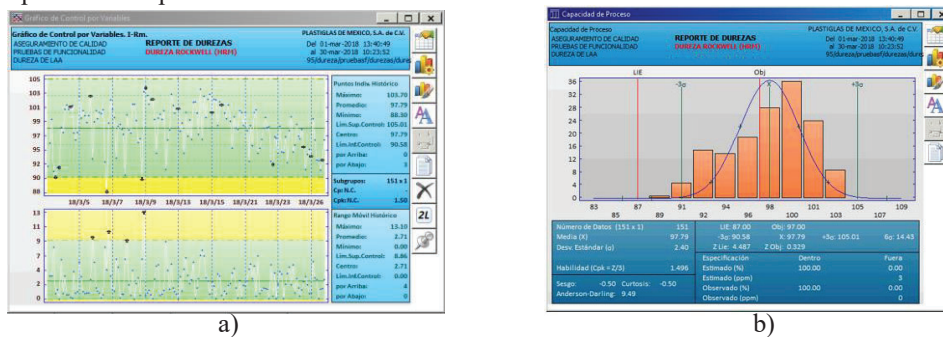


Figura 10. Reporte de dureza de una lámina acrílica después de la implementación de la metodología propuesta. a) Reporte de dureza en marzo 2019, b) Capacidad del proceso aceptable en dureza en 2019.

Como resultado de la implementación de esta metodología se tienen los siguientes puntos:

- Se tuvo un incremento en el tiempo donde la temperatura interna de la lámina permaneció en un valor de 105°C o superior un 12.5 % en el lado frío y un 30.3 % del lado caliente. Se supero con mucho el 5 % planteado en la hipótesis de este trabajo.
- Se presenta una mejora en la dureza del 9.7 % en la lámina de acrílico y se logró una dureza homogénea en toda la superficie. Se supero el 5 % objetivo de la hipótesis de este trabajo
- Debido a los puntos anteriores, el cumplimiento de las especificaciones en la fabricación de la lámina de acrílico desde la implementación de este trabajo se llevó a un 100 %, por lo que se redujo a cero el rechazo de los clientes y por lo tanto las pérdidas económicas por este defecto.

Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados anteriores se demuestra que, con la reconfiguración del horno de post-curado, la sincronización del tiempo de avance del producto dentro del proceso y la optimización del control de temperatura de las zonas de calentamiento de obtiene una lámina de acrílico con una mejor y más homogénea dureza.

Es importante monitorear la operación del horno en forma frecuente para asegurar que el perfil de temperatura se mantenga y por consiguiente la dureza de la lámina de acrílico, se recomienda realizar la prueba en forma mensual para detectar con tiempo cualquier variable fuera de especificación. Además, para mejorar aún más la dureza de la lámina se recomienda intercambiar las zonas de calentamiento 7 y 8 e implementar las mismas acciones de control que se realizaron en este trabajo, con esto, los tiempos tanto del lado frío y lado caliente arriba de la especificación serían similares. Esto permitiría que el producto alcance las propiedades necesarias en un menor tiempo y se podría aumentar la producción, es decir, se fabricarían más láminas en menor tiempo. También se recomienda evaluar la posibilidad de aumentar los sets points de las diferentes zonas de calentamiento y enfriamiento del horno esto para reducir aún más el tiempo de proceso dentro del horno de post-curado y poder aumentar la producción de lámina de acrílico.

Referencias

- Babo, S.; Ferreira, J.L.; Ramos, A.M.; Micheluz, A.; Pamplona, M.; Casimiro, M.H.; Ferreira, L.M.; Melo, M.J. Characterization and Long-Term Stability of Historical PMMA: Impact of Additives and Acrylic Sheet Industrial Production Processes. *Polymers* 2020, 12, 2198. <https://doi.org/10.3390/polym12102198>.
- García, G. O. Diseño e implementación de un horno autónomo para el secado de guantes de latex. Retrieved from Repositorio del sistema bibliotecario Universidad de San Carlos: <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/> (2016).
- Lipták, B. G. Process Control and Optimization. *Instrument Engineer's Handbook* (4ta ed.). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group. 2006.
- MathWorks. Matlab. Version 9.5.0.944444 (R2018b). Natick, MA, USA: The MathWorks Inc. 2018.
- Nise, N. S. Control System Engineering. Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc 2011.
- Ogata, K. Ingeniería de control moderna (5ta ed.). Madrid, España: Pearson Educación, S.A. 2010.
- Oviedo-Velázquez J. L. - Manual del Usuario Super CEP v.2016. Fábrica Digital, SA de CV. IMPI 794974, SEP 03-2000-031613051100-01. <http://www.supercep.mx/SuperCEP/supercep.htm> (2016).
- Pawar, E. A Review Article on Acrylic PMMA. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 4. 2016. DOI: 10.9790/1684-1302010104.
- PLASIGLAS. PLASTIGLAS. Retrieved from PLASTIGLAS: https://www.plastiglas.com.mx/uploads/uso_general/1625074437_5359a43c44c11989d0de.pdf. Página consultada en mayo 2022.
- Rockwell Automation. Literatura Rockwell Automation. Retrieved from Rockwell Automation: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/gr/1g500-gr002_-en-e.pdf. Página consultada en mayo 2022.
- Rockwell Automation Publication 1756-PM015M-EN-P - March 2022. Supersedes Publication 1756-PM015L-EN-P - November 2020. Logix 5000 Controllers Information and Status. https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pm/1756-pm015_-en-p.pdf.