

Optimización del Tratamiento Térmico de Productos Tubulares de Acero

Gabriel Acosta, Patricia Garcia, Juan D. Gonzalez, R. Alexis Muñoz Estéfano
FCEyN UBA

Christian Álvarez Tagliabue, Carolina Cincunegui, Pablo Marino
Tenaris

15 de junio de 2010

1. Introducción

Este trabajo se realizó en el Taller de Matematica Industrial que se se llevó a cabo durante la primera semana del mes de Marzo de 2010, en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

2. Generalidades

El problema a abordar es el de la optimización del tratamiento térmico de productos tubulares de acero, presente en la empresa siderúrgica Tenaris. Más específicamente, se estudia el problema de dar un tratamiento adecuado a cargas retenidas en el horno de revenido. En este caso, el tratamiento térmico se compone de un primer calentamiento de los tubos a temperaturas cercanas a los 900°C , en el que se austeniza el material, seguido por un enfriamiento rápido en el que el material se transforma en martensita. Esta etapa constituye el templado del acero. Para lograr las propiedades metalúrgicas finales especificadas para el producto se realiza un segundo calentamiento a temperaturas entre 500 y 700°C , que se denomina revenido (ver figura 1). Para simplificar el análisis, en este trabajo se considera una única propiedad metalúrgica, la dureza, que para el producto que se analiza debe estar en el rango de 270 - 300 Hv.

Dentro del horno de revenido (ver figura 2), los tubos son desplazados mediante un mecanismo de barras móviles a través de una serie de posiciones fijas (denominadas bolsillos), deteniéndose en cada una de ellas durante un período de tiempo denominado cadencia.

El horno está dividido en zonas que cuentan con una regulación independiente de temperaturas. De acuerdo a cuáles hayan sido las temperaturas de las zonas del horno a

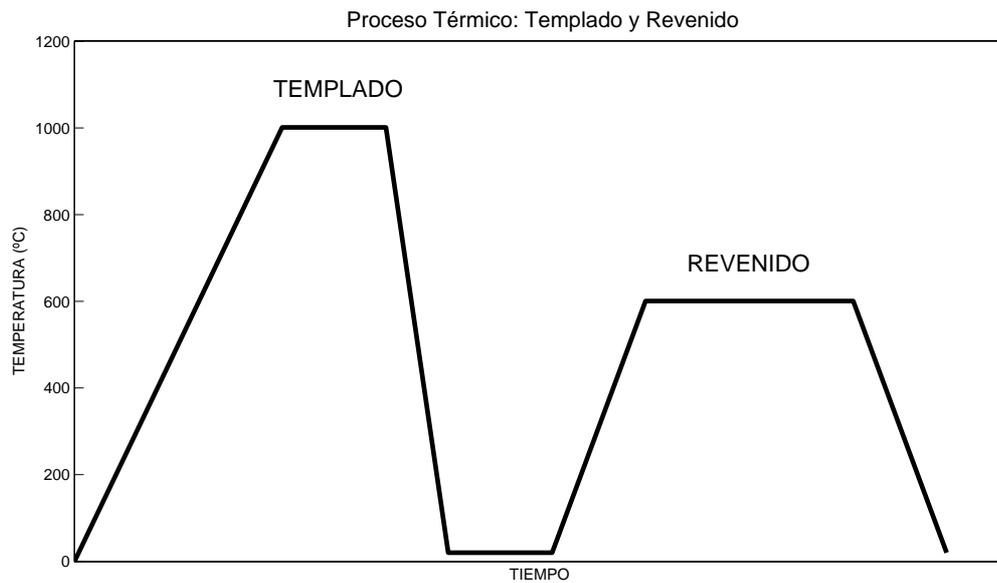


Figura 1: Esquema simplificado del ciclo térmico que se sigue en un proceso de temple y revenido

las que haya estado expuesto un tubo durante su pasaje por el mismo, éste seguirá una curva de calentamiento $T(t)$. Normalmente se utiliza el parámetro P , conocido como la versión integral del Hollomon-Jaffe, para caracterizar el avance del proceso de revenido:

$$P(t) = \int_0^t \exp^{-\frac{Q}{R \cdot T(s)}} ds$$

Donde $T(s)$ es la temperatura del tubo a tiempo $t = s$; Q es la energía de activación ($Q = 425000 \frac{\text{Joules}}{\text{Mol}}$); y $R = 8,315 \frac{\text{Joules}}{\text{Mol} \cdot \text{°K}}$;

Es posible correlacionar empíricamente a la dureza H con el parámetro P . En nuestro caso utilizamos la siguiente expresión:

$$H(P) = \begin{cases} H_0 - (H_0 - H_{min}) \cdot \frac{w^2}{(\log_{10}(P) - \log_{10}(P_{max}))^2 + w^2} = & \text{si } P \leq P_{max} \\ H_{min} & \text{si } P > P_{max} \end{cases}$$

con los siguientes valores para los parámetros:

- $H_0 = 480Hv$
- $H_{min} = 225Hv$

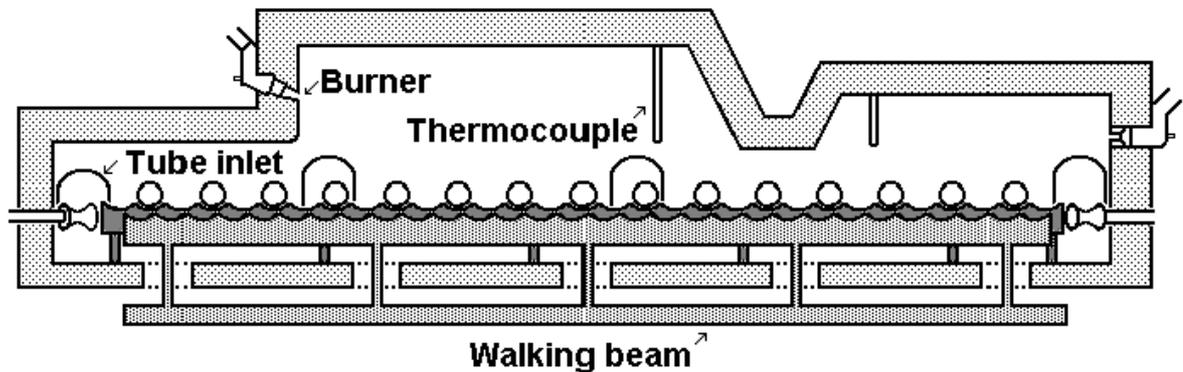


Figura 2: Sección transversal de un horno de tratamiento térmico

- $w = 4,6$
- $\log_{10}(P_{max}) = -18$

Se pone énfasis en el hecho de que el parámetro P es una integral de la temperatura, es decir que su valor (y luego la dureza H) depende de toda la historia térmica del tubo y no sólo de la temperatura que tiene el tubo al momento de salir del horno.

En condiciones normales, con el horno en funcionamiento estacionario, se determinan el tiempo de ciclo y las temperaturas adecuadas para cada zona, de forma tal que los tubos obtengan la dureza deseada.

3. Carga retenida-Estrategia Standard

Eventualmente, cuando hay problemas en la línea de producción, la carga puede quedar retenida en el horno. En estos casos, la mayor permanencia en temperatura produce una caída en la dureza de los tubos que la excluye del rango deseado y obliga a su reprocesamiento con los consecuentes costos extras. A esta situación la llamamos **Carga retenida**. El tiempo durante el cual la línea se encuentra detenida, se denomina tiempo de parada; el tiempo en el que la línea comienza a avanzar, tiempo de arranque.

A la política actual que utiliza la planta cada vez que la carga queda retenida, la denominamos **Estrategia Standard**, que consiste en:

- Habiendo transcurrido 5 minutos de producida la parada, se reducen 20°C las temperaturas de cada zona del horno.
- Una vez reanudada la producción, se restituyen las temperaturas de zona a los valores originales.

- Según el tiempo de duración de la parada y la zona del horno en que cada tubo haya quedado retenido, éstos son directamente reprocesados, inspeccionados para decidir si es necesario o no su reprocesamiento, o se considera que esta inspección no es necesaria.

Apuntando a lograr una mejora en la estrategia Standard, el primer objetivo de este trabajo consiste en determinar un plan de acción óptimo que minimice el perjuicio generado por las detenciones o “paradas”, suponiendo conocido el tiempo de parada y de arranque.

Disponer de una estrategia óptima suponiendo conocido el tiempo de parada permitirá un abordaje general, enfocado al estilo de Teoría de Juegos, para la situación real en la que la duración de la parada es desconocida. Este abordaje se comenta hacia el final del informe.

4. Modelado del Horno

Tenaris posee modelos muy completos del funcionamiento de los hornos de revenido [2], estos son modelos tridimensionales que tienen en cuenta la geometría real de los hornos y de los tubos, lo que los hace muy costosos computacionalmente. Teniendo en cuenta que las estrategias de optimización requieren numerosas evaluaciones del modelo, en este trabajo se realiza un modelo simplificado del horno que permite abordar el problema y obtener conclusiones que orienten el tratamiento con modelos más complejos. Dicho modelo simplificado consiste en:

- Dar una geometría más sencilla al horno (ver figura 3), dividiéndolo en cuatro zonas geométricamente iguales, cada una con una temperatura propia regulada individualmente.
- Simplificar la geometría de los tubos, considerándolos planos y de temperatura uniforme.
- Calcular la temperatura de los tubos considerando los intercambios de calor radiativos entre el techo, las paredes del horno y los tubos (para lo cual deben calcularse los correspondientes factores de vista) y convectivos, entre los gases del interior del horno (supuestos a la temperatura de la zona correspondiente) y los tubos.

Por lo tanto, las ecuaciones que determinan la temperatura $T_i(t)$ del tubo i en el instante t son de la forma:

$$\begin{cases} \rho c_p V \frac{dT_i}{dt} = & A_i q_i \\ T_{i(t=0)} = & T_{ambiente} \end{cases}$$

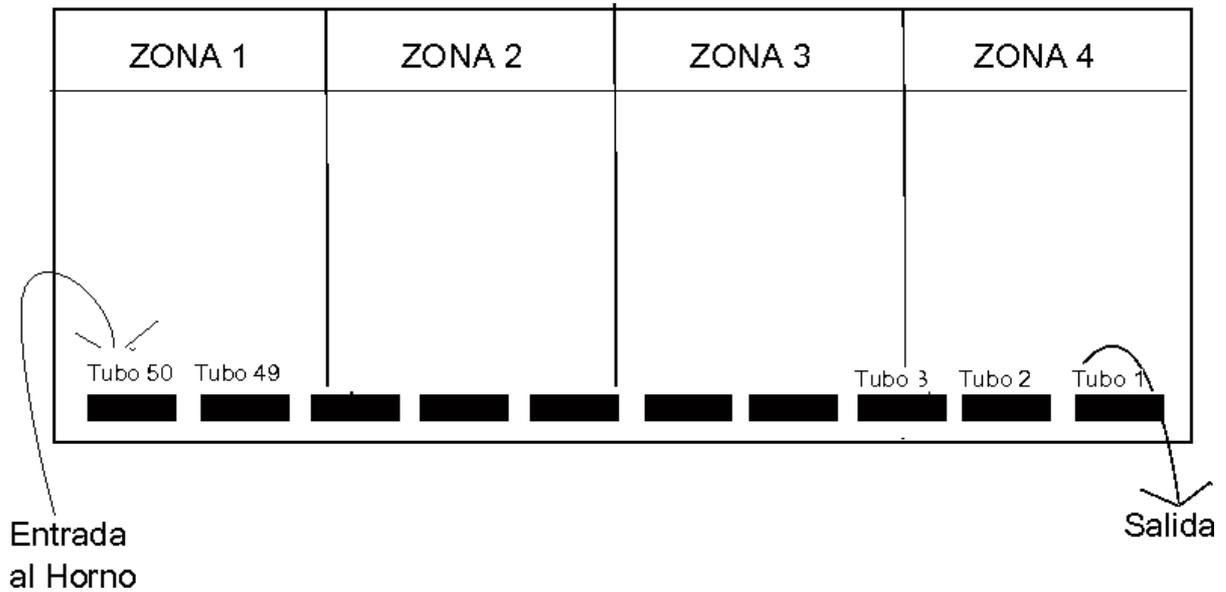


Figura 3: Horno de revenido simplificado

donde

$$q_i = M \cdot E_b(T_1, \dots, T_n, T_{Z_1}, T_{Z_2}, T_{Z_3}, T_{Z_4})$$

con T_{Z_j} las temperaturas de cada zona en el instante t , M una matriz relacionada con la matriz de factores de vista y $E_b(T)$ la potencia emisiva [1]. Se utilizan los siguientes valores para la densidad $\rho = 7840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y el calor específico del acero $c_p = 450 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$. A y V son el área y el volumen de los tubos. La temperatura ambiente es 20°C y la cadencia 60s.

En primer lugar, con este modelo se determinaron las temperaturas de zona de un régimen estacionario, realizando pruebas hasta alcanzar una dureza en los tubos a la salida del horno cercana al valor medio del rango de durezas deseado, o sea 285 Hv. Como resultado, se determinaron las siguientes temperaturas de zona: 600, 640, 680, y 680°C , con las que se alcanza una dureza de 287 Hv. En la figura 4 se observa el gráfico de la curva de temperaturas del tubo que logra esta dureza utilizando el modelo simplificado, que puede compararse con un perfil de temperaturas típico obtenido experimentalmente (figura 5).

5. Cuantificación de las pérdidas

Una vez ajustado el modelo a la dureza deseada, se analizaron los resultados correspondientes a una parada de 30 minutos en dos situaciones conocidas:

- En la primera se considera el caso en el que no se modifican las temperaturas de las

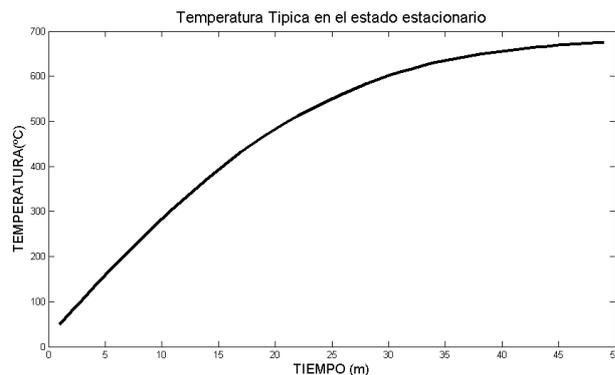


Figura 4: Curva de temperaturas obtenida con el modelo para el caso estacionario que produce la dureza especificada

zonas (es decir, no se toma ninguna acción). A este caso lo llamamos **Caso Neutro** y permite magnificar la magnitud del problema.

- La segunda consiste en aplicar la política actual de la planta (“**estrategia standard**”).

Los resultados de estas simulaciones se presentan en la figura 6, en la que la numeración de los tubos es la dada por la figura 3.

Luego, se buscó desarrollar estrategias que mejoraran los resultados obtenidos mediante la estrategia standard. Esta mejora se midió de dos formas: en primer lugar, mediante la cantidad de tubos con dureza resultante fuera del rango deseado; en segundo lugar, a partir de la desviación de las durezas obtenidas con respecto a la dureza del régimen estacionario, mediante un índice de desviación dado por la siguiente expresión:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - d_e)^2}{n - 1}} \quad (5.1)$$

Donde d_e indica la dureza que se logra en el estado estacionario; d_j , indica la dureza del tubo j al salir del horno; y n indica el número de tubos que estamos analizando para nuestro caso, $n = 100$, es decir, miramos los 50 tubos que quedan retenidos en el horno y los 50 siguientes.

Notemos que F es un promedio cuadrático de cuánto se aparta la dureza de cada tubo de la dureza estacionaria (que es la dureza deseada). Este factor F es la cuantificación usada para medir la efectividad de cada política de manejo de temperaturas de las zonas del horno ante una parada, dado que la dureza resultante en los tubos está sometida a fluctuaciones producidas por efectos no considerados por este modelo (v.g. inhomogeneidades de temperatura en el tubo o en la distribución inicial de durezas) que pueden generar

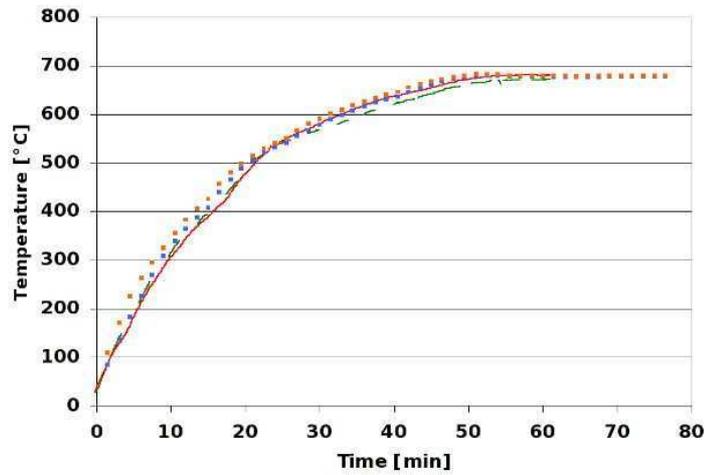


Figura 5: Típica curva de calentamiento estacionario en un horno de Revenido, obtenida experimentalmente

variaciones considerables con respecto a la dureza esperada. Así, un tubo con una dureza cercana a los límites del rango puede no estar sujeto en realidad a los requerimientos de calidad.

En la figura 6 se observa que, para una parada de 30 minutos, la estrategia standard es mejor que la estrategia neutra. La figura también indica los valores de F en cada situación. En especial, los valores de F en el caso Neutro son mayores que en el caso standard.

6. Optimización del Proceso Conociendo El Tiempo de Parada

En esta sección se estudia la posibilidad de mejorar la estrategia standard para paradas de duración conocida (30 minutos). El proceso se optimizó según distintos enfoques, en este trabajo se seleccionaron dos de ellos (de complejidad creciente). Para una mejor identificación de los mismos los notamos como **Estrategia Mejorada** y **Estrategia Optima**.

a) Estrategia Mejorada

En este caso, cada zona del horno se controla según dos parámetros. El primero, ΔT_Z , indica cuántos grados se desciende la temperatura (a razón de 3°C por minuto, que es el valor que típicamente limita las excursiones en las temperaturas de zona); el segundo, t_e , cuánto tiempo se espera antes de restituir la temperatura a su valor original. La restitución también se hace a razón de 3°C por minuto.

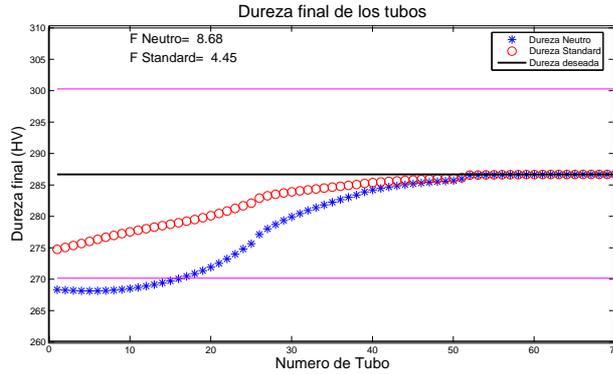


Figura 6: Dureza de los tubos al salir del horno después de una parada de 30 minutos

Observamos que cada par $(\Delta T_Z, t_e)$ representa un manejo de temperaturas de zona, es decir una estrategia adoptada. Lógicamente, el tiempo de descenso de la temperatura más el tiempo de espera debe ser mayor que la duración de la parada. De lo contrario, la restitución de la temperatura podría empezar antes del tiempo de arranque, generando una estrategia que abusa del hecho de que la duración de la parada está fija en 30 minutos. Por otro lado se permite empezar a restituir la temperatura un tiempo después del tiempo de arranque t_A (y no inmediatamente). Así se tiene la restricción:

$$\frac{\Delta T_Z}{3} + t_e \geq t_A - t_P$$

Donde por t_P entendemos tiempo de parada (el tiempo en el cual la carga queda retenida), t_A es tiempo de arranque (el tiempo en el cual se reanudó la línea de producción).

Luego, para cada una de las cuatro zonas se determinan pares $(\Delta T_Z, t_e)_j$, con $1 \leq j \leq 4$ que representan los controles de temperatura en las zonas del horno. De esta manera, para cada elección posible de $(\Delta T_Z, t_e)_j$, tenemos un valor del funcional F definido anteriormente.

$$F = F((\Delta T_Z, t_e)_j)$$

Se recuerda que F da una medida de cuanto se alejan los tubos de la dureza deseada, cuando son retenidos en el horno.

La optimización, se realiza minimizando el funcional F , que alcanza un mínimo(local) para un par $(\Delta T_{Z_0}, t_{e_0})_j$, que representa una estrategia. A esta estrategia obtenida la llamaremos **Estrategia Mejorada**. La minimización se desarrolló utilizando la función "fminsearch" de Matlab, esta rutina está inspirada en el algoritmo Nelder-Mead

simplex [3] y tiene como input, al funcional F y al par $(\Delta T_Z, t_e)_j$ inicial. El mínimo que logra este algoritmo es local, pero aún así se pudo mejorar el caso Standard con esta técnica.

La ventaja que tiene este algoritmo es que no necesita suavidad del funcional. Justamente, en la implementación del modelo del horno, se trabajó con tiempo a unidades discretas (el tiempo se midió en unidades de cadencia, es decir minutos enteros). Esta discretización del tiempo lleva a tener un funcional poco suave, impidiendo minimizaciones más eficientes mediante otros métodos que requieren suavidad en el funcional a minimizar.

La presentación del resultado de la estrategia mejorada, se da por medio de dos figuras, en la figura 7 se observa la dureza del caso estandar versus la dureza del caso mejorado. En la figura 8 se observa el manejo de las temperaturas de las cuatro zonas de los hornos.

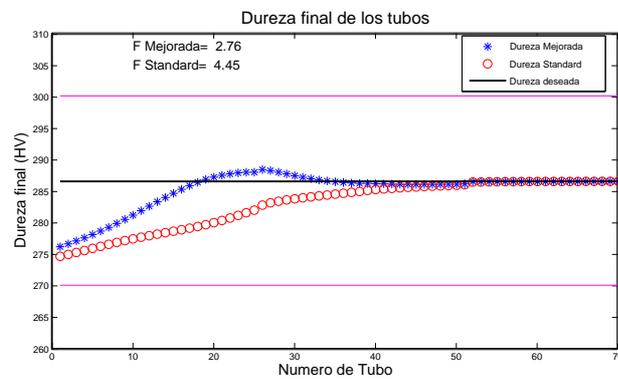


Figura 7: Dureza de los tubos: estrategia Mejorada versus estrategia Standard

- b) **Estrategia óptima** La otra estrategia seleccionada para presentar en este trabajo consiste en dar una mayor variabilidad a las temperaturas de zona permitiendo que las mismas varíen regularmente dentro del tiempo de parada más un margen extra de tiempo, de forma tal que cada vez que transcurre un tiempo determinado la temperatura de cada zona asciende o desciende, respetando la limitación de no variar más de 3°C por minuto. Finalizado este período, las temperaturas de zona son restituidas a sus valores estacionarios. En una primera instancia, se considera que las temperaturas de zona varían de igual forma. Esta estrategia da los mejores resultados hasta el momento, por ello es referida como **Estrategia óptima**. No obstante, es plausible obtener mejoras significativas en la estrategia óptima, ya que por falta de tiempo quedó pendiente analizar el caso en el que las temperaturas de zona puedan variar en forma independiente. Se presentan los resultados en las figuras 9 y 10, de la misma manera que se hizo para el caso anterior.

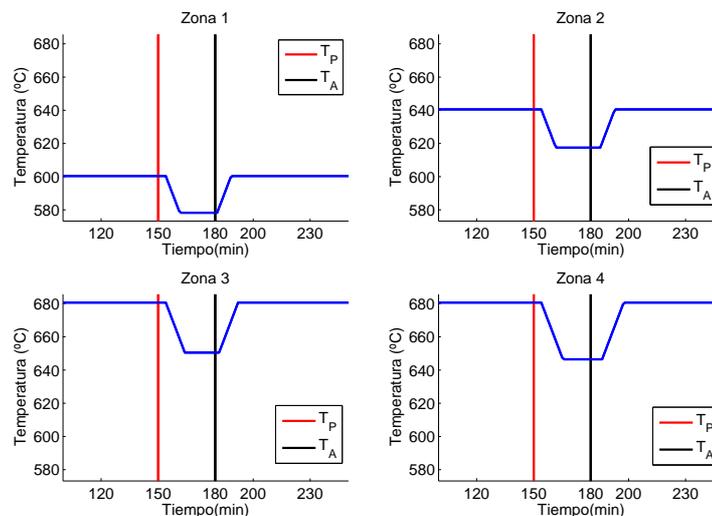


Figura 8: Manejo de los hornos para la estrategia mejorada

Todas nuestras estrategias fueron diseñadas en función a un mismo tiempo de parada (30 min).

7. Optimización del Proceso Desconociendo el Tiempo de Parada

En la Sección previa estudiamos el problema de buscar una estrategia que mejore a la Standard para un tiempo de parada de 30 minutos. En principio entonces es posible repetir esas ideas para diferentes tiempos de parada, de digamos 10, 20, ..., 120... minutos. Es de esperar que en cada caso varíen los parámetros óptimos dando lugar entonces a una serie de estrategias S_1, S_2, \dots cada una de ellas adecuada para enfrentar paradas de 10, 20, ... minutos. Considerando que el operador desconoce a priori la longitud de la parada aparece el problema de cuál de los S_j utilizar en una parada dada. Si bien durante el taller no hemos llegado a explorar esta cuestión en profundidad proponemos algunas ideas que consideramos pueden resultar útiles en este sentido. Vamos a introducir estas ideas de un modo general. Por un lado podemos pensar que que trabajamos con una función de costo genérica F que no necesariamente tiene que coincidir con (5.1). A cada falla (parada) vamos a llamarla evento utilizando una numeración consecutiva E_1, E_2, \dots para paradas de 10, 20, ... Fijada la función F podemos entonces calcular el costo $F_{i,j}$ de utilizar una estrategia S_i ante un evento E_j . Por último vamos a generalizar las nociones de eventos y estrategias: un evento E es una distribución de probabilidades sobre los E_i (i.e. $E = \{q_1, q_2, \dots\}$ donde $P(E_i) = q_i$) y análogamente una estrategia S es una distribución

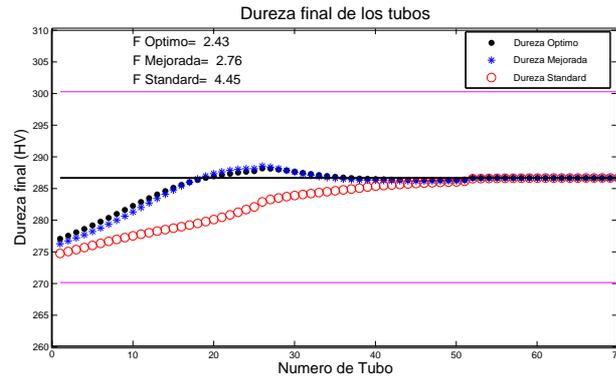


Figura 9: Dureza de los tubos para las estrategias Optima, Mejorada y Standard

de probabilidades sobre las S_i (i.e. $S = \{p_1, p_2, \dots\}$ donde $P(S_i) = p_i$). En este sentido elegir una estrategia ahora corresponde a elegir una distribución de probabilidades que me diga como utilizar las S_i .

Esta claro que si se elige una S y una E entonces el costo resultante es (en valor esperado, y considerando que las elecciones se realizan de modo independiente)

$$F(S, E) = \sum_{i,j} p_i q_j F_{i,j} \quad (7.1)$$

y esto nos conduce a las dos siguientes alternativas:

1. Trabajar con E conocido.
2. Trabajar con E desconocido.

El caso 1) es útil si se tiene una estadística confiable de las fallas. En ese caso la solución del problema buscado corresponde a minimizar (7.1) sujeto a la restricción $\sum_i p_i = 1, p_i \geq 0$ (observar que tanto q_j como $F_{i,j}$ son conocidos en este caso). Para dar una respuesta en el caso 2) el problema se piensa en el marco de la teoría de juegos. Si suponemos que los $F_{i,j}$ nos dan la matriz de pagos de un juego de suma cero y que los E_i y S_i representan las estrategias de cada uno de los jugadores, entonces el jugador de estrategias S_i (operario de la planta) debería calcular la estrategia óptima (el S) dada por la teoría de juegos de suma cero. Un juego de suma cero tiene siempre un precio (o valor) que es lo que debe pagar una de las partes para que el juego sea justo. El Teorema del Minimax [4] asegura que siempre existe al menos una estrategia (denominada óptima) para cada jugador que le permite a uno de ellos asegurarse esa ganancia y al otro limitarse a esas pérdidas (independiente de lo que elija hacer su oponente). No entramos aquí en detalles, la perdida garantizada por el operario es

$$\min_S \max_E F(S, E)$$

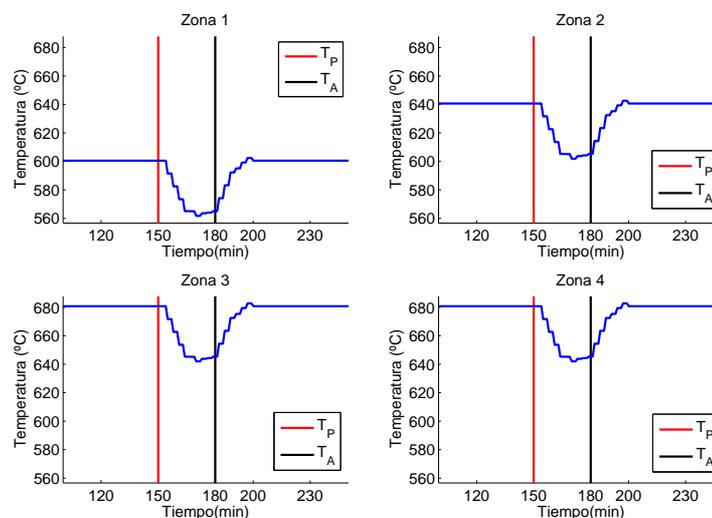


Figura 10: Manejo de los Hornos para la Estrategia Optima

la estrategia óptima puede calcularse fácilmente resolviendo un problema de programación lineal. En algún trabajo posterior estudiaremos la viabilidad de estas ideas.

8. Conclusiones

Se implementó un modelo simplificado del calentamiento de tubos en un horno de revenido, que permite evaluar el efecto de distintos tratamientos en las temperaturas de las zonas a fin de minimizar el número de tubos a ser reprocesados. Los resultados obtenidos, aunque de carácter preliminar, están cualitativamente de acuerdo con la práctica industrial y muestran posibilidades de mejora a través de una mayor reducción de las temperaturas de zona durante la parada y postergando el momento en el que se restituyen las temperaturas de zona correspondientes a la operación estacionaria. Por último se discute la forma de implementar una estrategia para paradas de duración desconocida, apelando a la Teoría de Juegos.

Referencias

- [1] LIENHARD, J. H. IV, LIENHARD, J. H. V *A heat transfer textbook*, Phlogiston Press, 2005.

- [2] MARINO, P. *Numerical Modeling of Steel Tube Reheating in Walking Beam Furnaces*, Proceedings of The Fifth European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Espinho, Portugal, 11-14 April 2000
- [3] LAGARIAS, J. C., REEDS J. A., WRIGHT M. H., AND WRIGHT P. E., *Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions.*, SIAM Journal of Optimization, Vol. 9, Number 1, 1998, pp. 112-147
- [4] DUNCAN LUCE, R., RAIFFA, H. *Games and Decisions*, Dover, 1989.