

Mejora de la pirometría infrarroja aplicada a hornos de recocido continuo

TAMI 2010 - Reporte final

Participantes: Jorge Solanes, Javier Etcheverry

Presentador del problema: Gabriel Cervellini, Diego Migliorino, Ternium.

Resumen del problema

En muchos procesos de calentamiento industrial (líneas de galvanizado continuo, producción de tubos de acero, fusión de vidrio, etc.) se debe calentar rápidamente la carga logrando al mismo tiempo un control preciso de su temperatura final. Para lograr este control es necesario medir apropiadamente la temperatura de la carga, lo que se debe normalmente realizar sin contacto (ya que la carga se traslada dentro del horno, a veces a velocidades considerables). La solución tecnológica actual consiste en utilizar pirómetros infrarrojos (instrumentos que miden la radiación en el infrarrojo que sale de la superficie de la carga en cierta dirección dada, habitualmente en un intervalo de longitudes de onda fijo, e infieren la temperatura de la superficie a partir de ella).

Esta solución dista mucho de ser óptima, por varios motivos. Uno, la radiación que sale de la superficie no es sólo radiación emitida por la superficie (que testimonia su temperatura) sino radiación reflejada desde otros puntos de la cavidad del horno. Esta radiación reflejada en muchos casos puede ser mucho más intensa que la emitida (por razones de productividad la temperatura del horno es normalmente superior a la temperatura de la carga). En segundo lugar, las propiedades ópticas de las superficies que son relevantes para esta técnica (emisividad, por ejemplo) están habitualmente mal caracterizadas y dependen mucho del estado superficial de la carga que en muchos casos es incontrolable.

La tecnología actual ha desarrollado mucho estos instrumentos, hasta el punto en que es posible medir simultáneamente la radiación proveniente de varios puntos diferentes, en varios intervalos de longitud de onda distintos.

La propuesta de este trabajo consiste en pensar cuál es la promesa de estos instrumentos mejorados para la medición de temperatura; hallar, si es posible, configuraciones de distintas direcciones de vista/distintas longitudes de onda que proporcione mediciones más precisas, robustas, etc.

Desde el punto de vista técnico, trabajar exitosamente con este problema involucraría hacer / perfeccionar modelos de los intercambios de radiación dentro de una cavidad con superficies a distintas temperaturas y con distintas propiedades ópticas; realizar análisis de sensibilidad de los parámetros que se desee medir respecto de las perturbaciones (tanto de temperaturas y propiedades de las superficies como 'errores de modelización').

Introducción

En las líneas de galvanizado continuo se aplica el revestimiento mediante la inmersión en un baño metálico correspondiente al tipo de protección (galvanizado o cincalum). Previo a esta etapa, la chapa debe pasar por un horno de recocido para producir una recristalización de los granos del acero altamente deformados en el proceso de laminación en frío.

El recocido es un tratamiento térmico que consiste en hacer seguir al acero una curva de calentamiento controlada a fin de obtener las propiedades mecánicas deseadas para cada producto según su utilización final.

Una línea de este tipo se divide básicamente en tres etapas:

- Horno de llama directa, F1 o DFF, donde se aplica directamente sobre la chapa la llama de combustión produciendo un calentamiento rápido de la misma hasta una temperatura de alrededor de 630°C. La acción térmica y mecánica de la llama también sirve para limpiar restos de aceite de laminación.
- Horno de tubos radiantes, F2 o RTF. En esta sección del horno la combustión se realiza dentro tubos que atraviesan transversalmente el horno, de tal modo que los gases de combustión no tienen contacto directo con la chapa. El calentamiento se produce por radiación en una atmósfera reductora controlada para eliminar los restos de óxidos que la superficie de la chapa pueda tener. La temperatura de la chapa al finalizar es del orden de 680°C
- Enfriamiento o Jet Coolers. Consiste en un enfriamiento del material por convección forzada de atmósfera reductora (mezcla de nitrógeno e hidrógeno) hasta una temperatura cercana a la del baño metálico de galvanizado o cincalum, 480°C para galvanizado y 590°C para cincalum.

Como control del proceso de recocido, es necesario conocer la temperatura a la salida de cada una de estas etapas. Para ello el horno cuenta con recintos intermedios lo más aislados posible de los hornos de calentamiento, donde hay instalados pirómetros infrarrojos para realizar la medición.

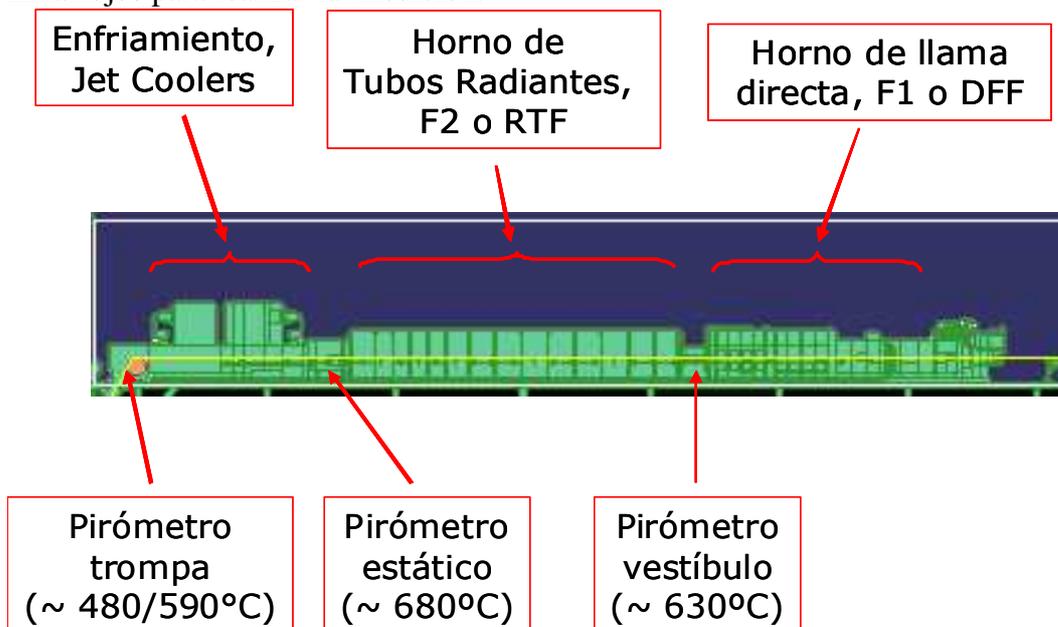


Figura 1. Diagrama de un horno de recocido continuo y sus etapas.

Resulta imprescindible entonces conocer con la mayor precisión posible la curva de temperatura aplicada sobre la chapa para asegurar la robustez del proceso, y por ende, poder garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad de cada producto.

Sin embargo no siempre se cuenta con la información lo suficientemente precisa ya que la pirometría es una técnica muy sensible a algunos factores difíciles de medir y controlar.

Estos errores de medición provocan problemas de proceso o de calidad que se traducen en un mayor costo económico de producción. Algunos de ellos son:

- Dificultad para cumplir ciclos térmicos de los distintos productos.
- Pérdidas cualitativas por defectos en revestimiento (piojillo, puntos negros) e inadecuadas propiedades mecánicas (tensión de fluencia, alargamiento a la rotura, etc).
- Desaprovechamiento de equipos cuando las temperaturas medidas por pirómetros son la variable de control de un lazo de control automático.
- Dificultades para calibrar modelos matemáticos que necesitan datos empíricos fidedignos para su puesta a punto.
- Incoherencia en variables de proceso y dificultad para encontrar su verdadera causa (excesivo consumo de aleantes, variaciones en la composición química de los baños metálicos, etc).

Pirometría

Si un cuerpo se encuentra a una temperatura superficial T emite en forma de radiación un flujo de potencia con una distribución espectral según la Ley de Planck:

$$E_{\lambda}(T, \theta, \phi) = \frac{C_1 \varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi)}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

donde,

E_{λ} es la potencia emitida en la dirección espacial dada por los ángulos θ y ϕ ,

C_1 y C_2 son las primera y segunda constantes de Planck,

T es la temperatura *absoluta* a la que se encuentra la superficie radiante.

ε es la emisividad del cuerpo, que a su vez depende de la longitud de onda, su temperatura, y la dirección de radiación,

λ es la longitud de onda de la radiación

Cabe mencionar que la emisividad de una superficie es el cociente entre la potencia emitida por ella a esa longitud de onda y temperatura, y la que emite un cuerpo negro en las mismas condiciones (emisor perfecto).

De esta ecuación se deduce que conociendo la potencia emitida a una cierta longitud de onda, y la emisividad de la superficie, se puede determinar la temperatura a la superficie T .

Utilizando la ley de Planck, y considerando el caso de un cuerpo negro, se obtiene la siguiente figura, donde se grafica la potencia de radiación emitida en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas de superficie (dadas en °K).

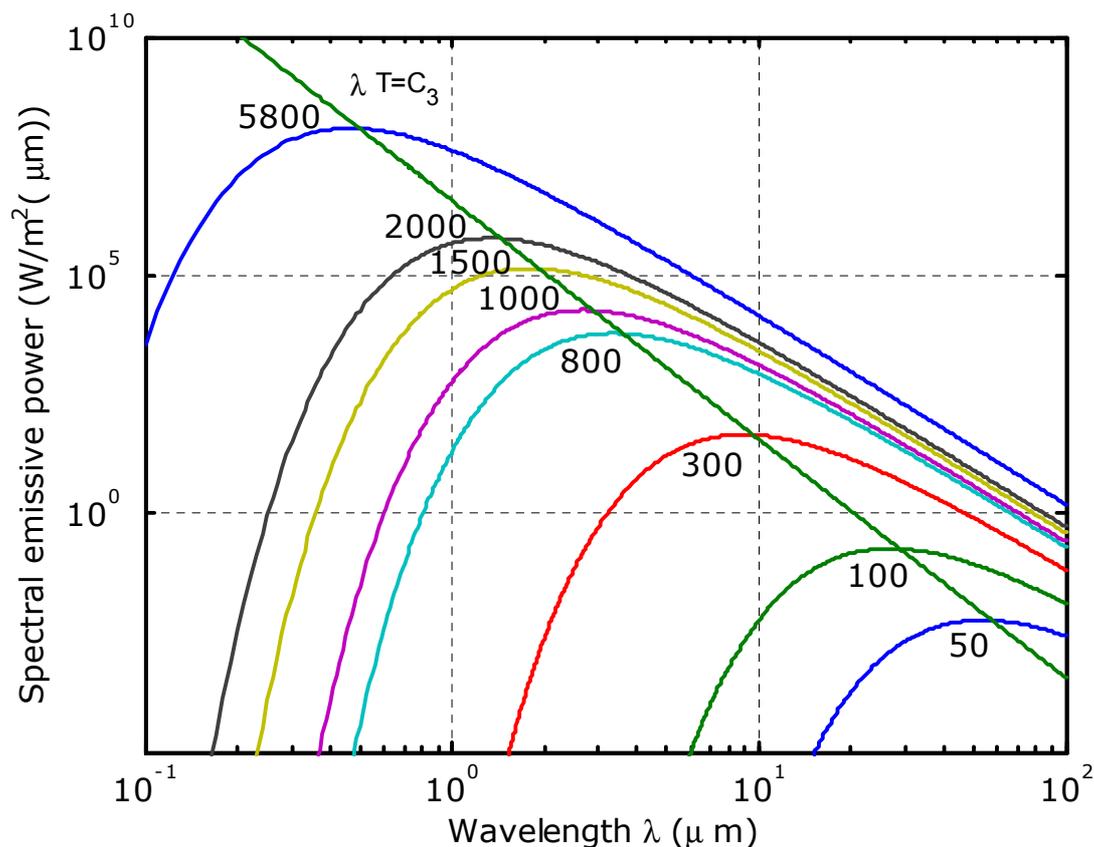


Figura 2. Espectro de radiación de un cuerpo negro.

Se observa que a mayor temperatura, el máximo de potencia se encuentra en longitudes de onda más cortas. Esta característica será de utilidad más adelante a la hora de seleccionar la longitud de onda para la medición.

Un pirómetro monocromático es básicamente un instrumento de medición que genera una señal $S(T)$ proporcional a la potencia radiante que recibe E_λ , para luego determinar la temperatura de la superficie. Para poder realizar este cálculo, el usuario debe conocer la emisividad de la superficie que se está midiendo.

En muchos casos de interés, $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$, por lo que en estas condiciones se puede simplificar el denominador en la ecuación de Planck, obteniendo para la señal medida por el instrumento la expresión:

$$S(T) = K \varepsilon \exp(-C_2/\lambda T)$$

En esta ecuación, la constante K está determinada por la calibración del instrumento, y la emisividad de la superficie es proporcionada por el usuario.

Suponiendo que el medio que se interpone entre la fuente y el instrumento no absorbe ni emite radiación infrarroja en el rango de frecuencias utilizado, los requerimientos básicos para una correcta medición son:

La radiación que recibe el instrumento tiene que ser emitida por el blanco y no reflejada por el mismo (radiación de fondo).

La emisividad del blanco debe ser conocida.

Radiación de fondo

Si el ambiente en el que se encuentra el blanco está caliente, el pirómetro recibe la radiación del fondo mediante su reflexión previa en el blanco. A su vez, la reflexión sobre la superficie puede ser difusa y/o especular dependiendo las características de la misma.

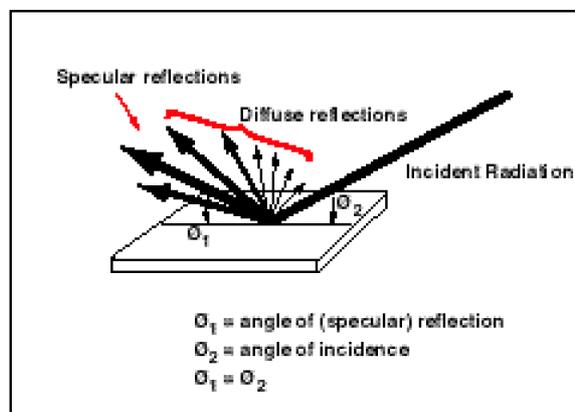


Figura 3. Reflexión del fondo sobre el blanco.

Para el caso de la chapa el porcentaje de reflexión especular varía entre 80 y 90%, mientras que el de reflexión difusa η va de 10 a 20% [1].

La radiación de fondo produce errores de medición, por lo que es importante evitarla. Existen principalmente dos formas de conseguirlo:

- Seleccionando la longitud de onda de medición adecuada para la aplicación: Se observa en la Figura 1 que no sería adecuado seleccionar $\lambda=1\mu\text{m}$ para medir un cuerpo a 800°K si el fondo se encuentra a 2000°K , ya que a esa longitud de onda el fondo emite con un orden de magnitud tres veces mayor al blanco. Es mucho más razonable seleccionar $\lambda\sim 2,5\mu\text{m}$ ya que el orden de magnitud del fondo respecto al blanco es uno.
- Proteger el campo de visión del instrumento de las reflexiones del fondo (principalmente especulares). Una solución utilizada es la de montar un tubo de vista al instrumento. Ver Figura 4.

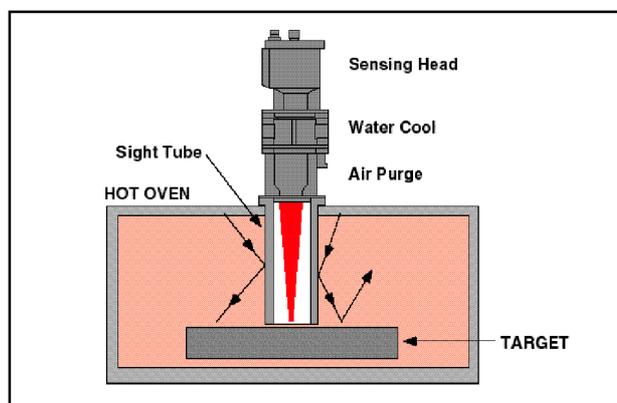


Figura 4. Tubo de vista.

Emisividad del blanco a medir

En el caso de las superficies metálicas, la emisividad en el infrarrojo suele disminuir con el aumento de la longitud de onda. Es de todas maneras una magnitud muy compleja, que varía según la rugosidad de la superficie, su textura, su limpieza, etc, todas variables difícilmente controlables en un ambiente industrial.

El error de la emisividad seteada en el instrumento respecto de la real del blanco es una de las causa los errores de lectura. Mientras menor sea el valor de emisividad, sus variaciones provocarán errores porcentuales más considerables

En general, se recomienda tomar ciertos recaudos para minimizar estos errores:

Seleccionar la longitud de onda más corta posible para tener una mayor emisividad del blanco. Como se mencionó más arriba, esto podría incrementar significativamente los errores debidos a la radiación de fondo, y por lo tanto debe hallarse una solución de compromiso.

Si se desconoce el valor de la emisividad, pero se conoce el cociente de ellas a dos longitudes de onda distintas, se puede utilizar un pirómetro bicolor.

Este tipo de instrumentos mide la potencia irradiada a dos longitudes de onda, y luego realiza el cociente de ellas [2]. De esta manera no es necesario conocer el valor absoluto de las emisividades, sino su cociente (lo que se denomina e-slope) para determinar la temperatura de la superficie. Sin embargo, estos instrumentos son muy sensibles a la radiación de fondo.

Para el desarrollo del trabajo se supondrá que la emisividad de la chapa responde a la aproximación basada en datos empíricos medidos por el proveedor LAND [1]:

$$\varepsilon_{\lambda} = \beta (1/\lambda)^{\alpha}, \quad \alpha = 0,564, \quad \beta = 0,478$$

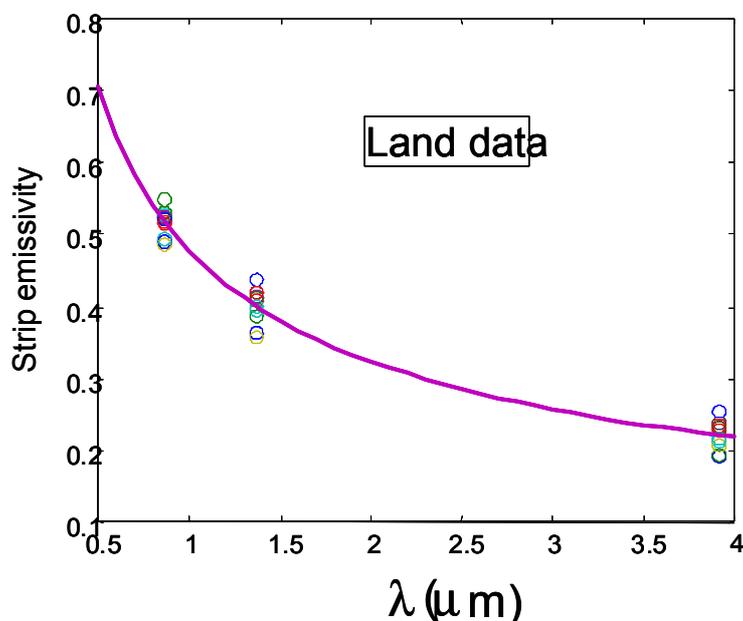


Figura 5. Emisividad de chapa de acero. Los círculos corresponden a datos empíricos reportados por el proveedor LAND, mientras que la línea continua corresponde a la aproximación analítica reportada en el texto.

Desarrollo

Ecuaciones del balance energético en una cavidad gris difusa

Las superficies que constituyen la cavidad pueden descomponerse en N porciones de área. El estado térmico de la k -ésima porción estará definido por tres variables:

T_k : temperatura de la superficie.

q_k : Potencia neta recibida/entregada por la superficie por medios no radiativos.

q_k^o : potencia irradiada por la superficie.

Planteando la condición de equilibrio radiativo del sistema, se puede llegar a un sistema de $2N$ ecuaciones de la forma:

$$q_k = \frac{\epsilon_k}{1 - \epsilon_k} (\sigma T_k^4 - q_k^o)$$

$$q_k = q_k^o - \sum_{j=1}^N F_{k-j} q_j^o, \quad k=1, \dots, N.$$

F_{k-j} es el factor de vista del elemento j respecto al elemento k , es decir cuánto de la radiación que emite k es recibida por j .

Este sistema de $2N$ ecuaciones tiene $3N$ incógnitas por lo que será necesario establecer N condiciones adicionales para que tenga una única solución. La situación típica es especificar o bien el flujo neto o bien la temperatura para cada elemento [3]. En el caso en que hay superficies no grises y/o no difusas estas ecuaciones son mucho más complejas, involucrando integrales sobre la longitud de onda y efectos direccionales. Cuando las superficies son grises y parcialmente especulares los factores de vista pueden modificarse adecuadamente para tenerlo en cuenta.

Previo al desarrollo del TAMI, se contaba con un modelo matemático que implementa este balance en algunas regiones de los hornos de recocido de las líneas de galvanizado de Canning y Haedo de Ternium, realizado bajo la siguiente aproximación. Utilizando emisividades promedio se calcula la distribución de temperaturas de equilibrio en la cavidad. Con esa distribución de temperaturas dada se calculan luego los flujos radiativos a cada longitud de onda de interés, utilizando emisividades adecuadas para dichas longitudes de onda. El cálculo de los factores de vista se realiza mediante la utilización del Método de Monte Carlo [4].

Aplicación del modelo al vestíbulo de Canning

La geometría del vestíbulo está representada en la siguiente figura:

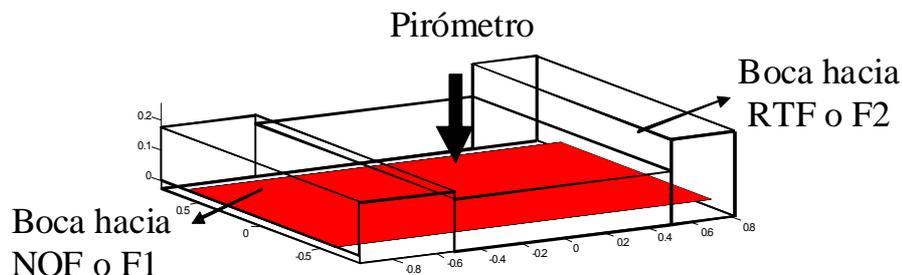


Figura 6. Geometría del vestíbulo de Canning.

La pared frontal es la apertura hacia el horno de llama directa y la trasera hacia el horno de tubos radiantes. Se considera que ambas superficies se comportan como un cuerpo negro a la temperatura correspondiente a cada horno, ya que es muy poco probable que un haz de radiación que ingrese a estos hornos vuelva hacia el vestíbulo nuevamente. Las paredes laterales, que encierran el resto del volumen, están recubiertas por refractario, por lo que se consideran adiabáticas, salvo la posición del pirómetro que cuenta con un tubo de vista refrigerado con agua ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Como primera utilización del modelo, se supone que la chapa (superficie en rojo) está a una temperatura conocida de 630°C , y que las temperaturas de las superficies que conectan a los hornos de llama directa y tubos radiantes son 1230°C y 850°C respectivamente. A partir de estas se obtienen las temperaturas de equilibrio estacionario del vestíbulo.

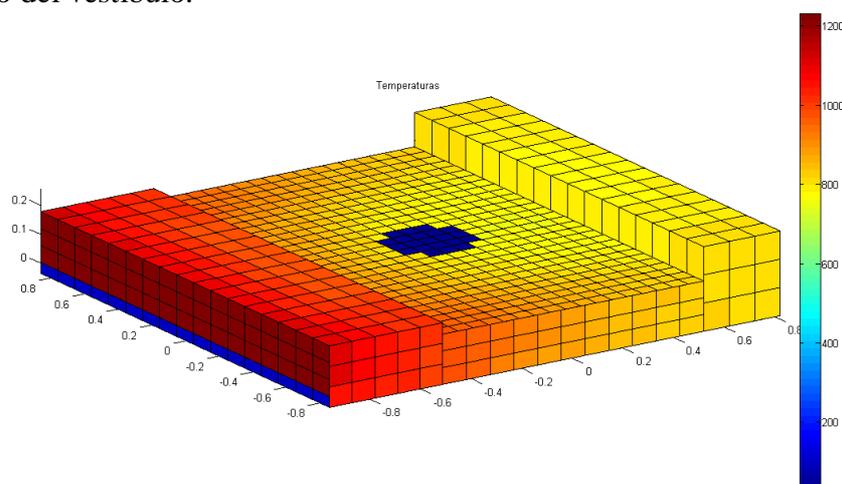


Figura 7. Distribución de temperaturas en equilibrio estacionario ($^{\circ}\text{C}$).

Conociendo la distribución de temperaturas, se puede determinar la potencia de radiación espectral que recibiría un instrumento ubicado en la posición indicada en la Figura 6. Para hacer esto, se realizaron corridas del modelo cambiando la longitud de onda y recalculando las matrices de factores de vista para cada caso (ya que la emisividad de la chapa depende de la longitud de onda). Los resultados se muestran en el siguiente gráfico (círculos azules). Se puede observar que la radiación que ingresa al tubo de vista del pirómetro tiene un máximo de potencia cerca de los $3\mu\text{m}$.

Para describir de manera simplificada el flujo incidente sobre el pirómetro se puede considerar que es la suma de la radiación propia de la chapa (a T_c) más la contribución individual de cada porción de superficie de la cavidad a través de la reflexión difusa de la radiación saliente de ella en el área de la chapa hacia adonde apunta el pirómetro (se desprecia la reflexión especular por contar con un tubo de vista):

$$S_p = \varepsilon_{c,\lambda} E_{\lambda,T_c} + (1 - \varepsilon_{c,\lambda}) \eta_c \sum_{j=1}^N q_j^o F_{j-p}$$

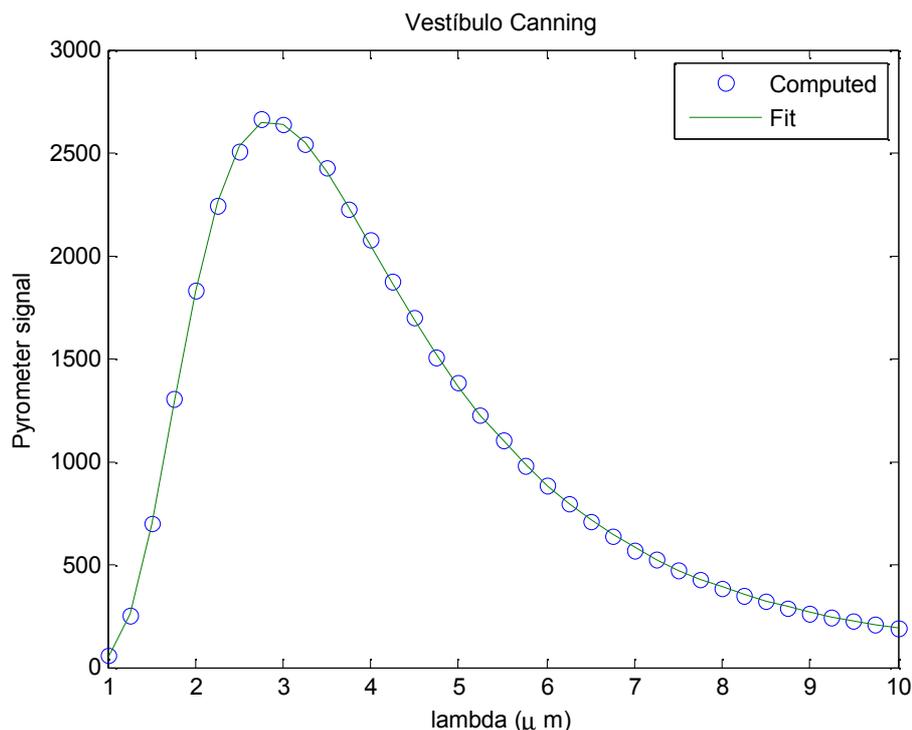


Figura 8. Señal recibida por el pirómetro en el espectro de radiación.

Una simplificación de esta ecuación sería considerar que la radiación de fondo proviene de una única superficie a una cierta temperatura T_o . Entonces la ecuación pasaría a tener la forma:

$$S_p = \varepsilon_{c,\lambda} E_{\lambda,T_c} + (1 - \varepsilon_{c,\lambda}) \eta_c E_{\lambda,T_o} F_{o-p}$$

Esto representa físicamente la composición de dos de las curvas de radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas, como las representadas en la Figura 2.

Se ajustó esta ecuación variando las temperaturas de la chapa T_c y del fondo T_o , y el factor de vista del pirómetro con el fondo F_{o-p} , y manteniendo los coeficientes de emisividad y reflectividad conocidos. El ajuste fue muy bueno y está trazado en la Figura 8 por la línea continua.

Las temperaturas obtenidas para la chapa y el fondo fueron 620 y 860°C respectivamente. El error de temperatura de la chapa obtenido por esta aproximación es de 10°C, es decir -1,6%. A su vez, el fondo estaría a una temperatura muy inferior a la del horno de llama directa, el cual se pensaba que era la mayor fuente de radiación de fondo en primera instancia.

Lo importante ahora sería poder cuantificar las contribuciones relativas a la radiación que ingresa al pirómetro. Esto es, saber cuál es la relación entre lo emitido y lo reflejado por la chapa proveniente de cada región de la cavidad.

Para conocer esto, en primer lugar se evaluó individualmente la contribución de cada porción de superficie $q_j^o F_{j-p}$ a la señal del pirómetro para las distintas longitudes del espectro. El resultado para longitudes de onda de 1 y 2,5 μm se observa en la Figura 9.

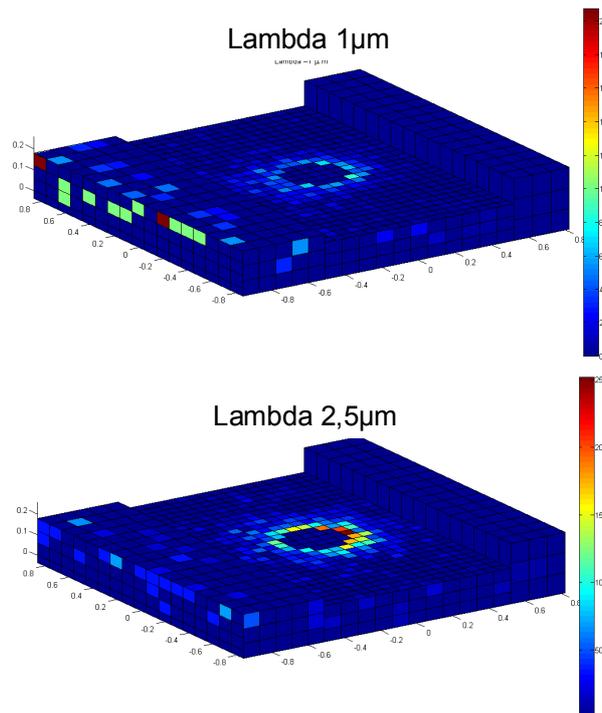


Figura 9. Contribución de los elementos del fondo a la señal del pirómetro.

Se puede apreciar que para menores longitudes de onda corta prevalece la contribución del horno de llama directa. Sin embargo, a medida que se incrementa la longitud de onda se hace evidente que la mayor contribución proviene del techo del vestíbulo, principalmente de la zona circundante el tubo de vista. Para tener una apreciación de la contribución total de cada parte, se integró la contribución sobre las tres superficies más significativas: horno de llama directa, horno de tubos radiantes y techo del vestíbulo.

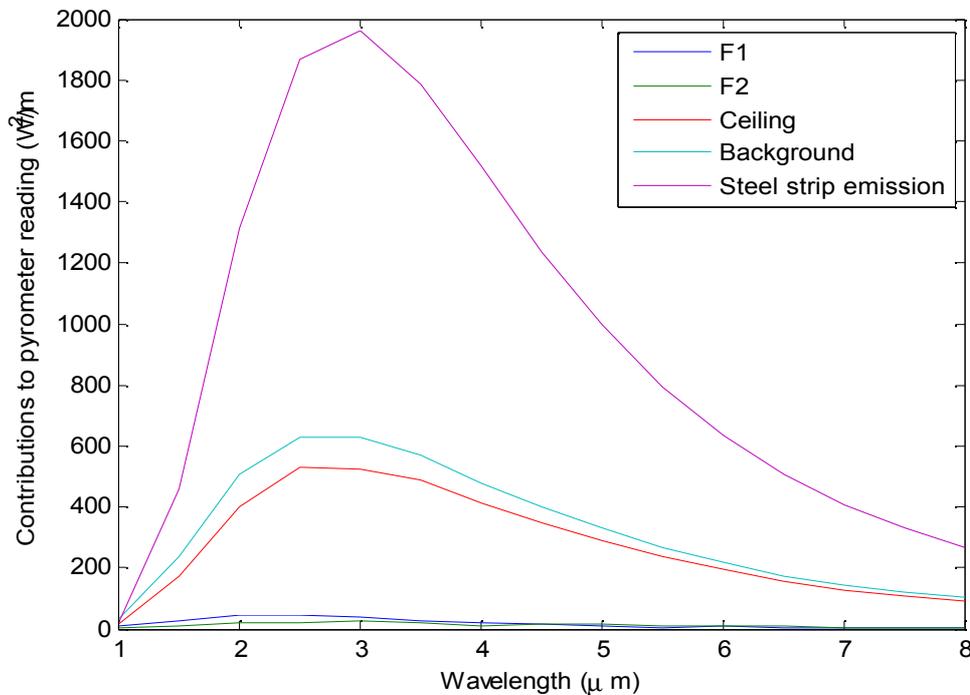


Figura 10. Contribución de las distintas superficies a la señal del pirómetro.

Se observa que, para todo el espectro, la mayor proporción de la radiación de fondo proviene del techo.

Al obtener estos resultados, el interrogante que surgió fue si se reduciría la proporción de radiación de fondo vista por el instrumento si el techo se comportase como un cuerpo negro. De ser así, se evitaría que se produzcan reflexiones de otras superficies sobre el mismo y luego terminen en el pirómetro. Pero, por otra parte, al ser un cuerpo negro absorberá toda la radiación que reciba y su temperatura de equilibrio será mayor, por lo que emitirá más.

Se realizaron las corridas correspondientes y se graficó el cociente entre la potencia que emitida por la chapa y la proveniente del fondo.

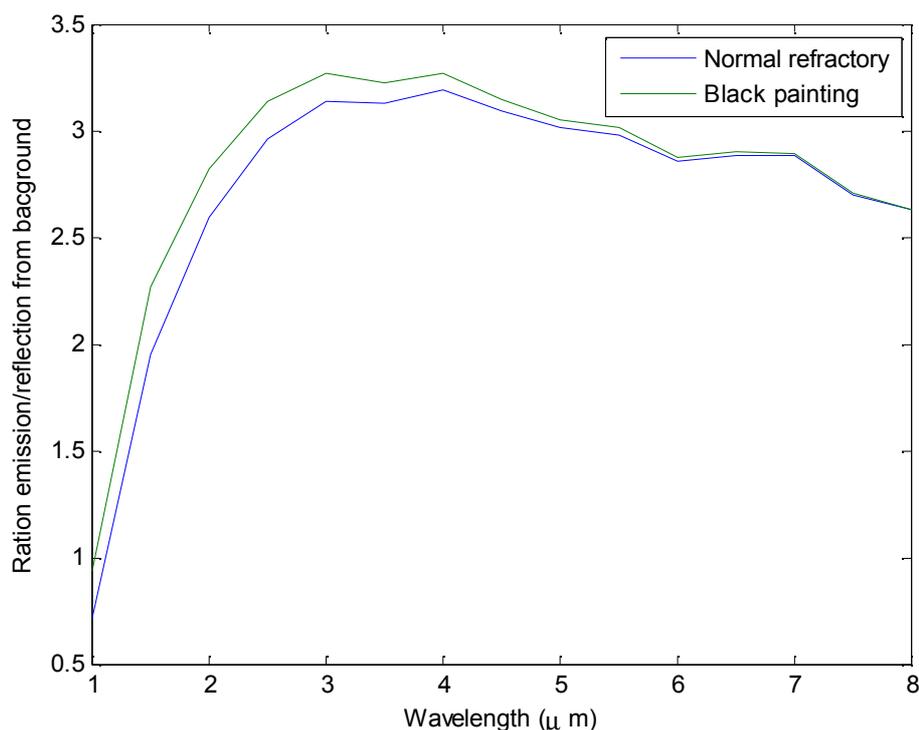


Figura 11. Cociente de contribución chapa/fondo para dos condiciones del techo.

Se observa una mejora en el cociente de contribuciones cuando el techo se comporta como cuerpo negro. A pesar de esto, no parece ser lo suficiente considerable como para justificar esta modificación.

Se concluye de esto que conviene tratar de mejorar el tubo de vista antes de pintar el techo de negro.

Aplicación del modelo al estático de Canning

Se aplicó nuevamente el modelo al recinto en el que se encuentra instalado el pirómetro del estático.

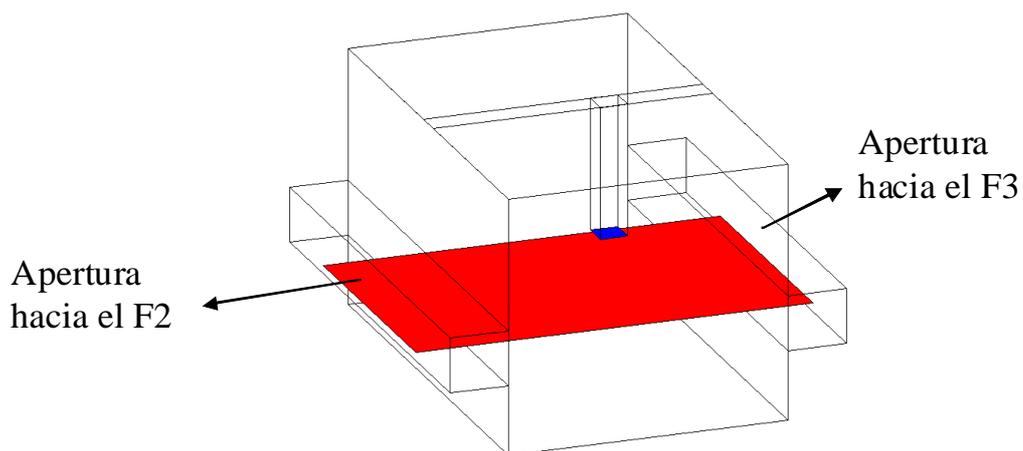


Figura 12. Recinto del pirómetro del estático.

En primera instancia se calculó la temperatura de equilibrio estacionario del recinto imponiendo las condiciones de contorno de forma similar al caso anterior.

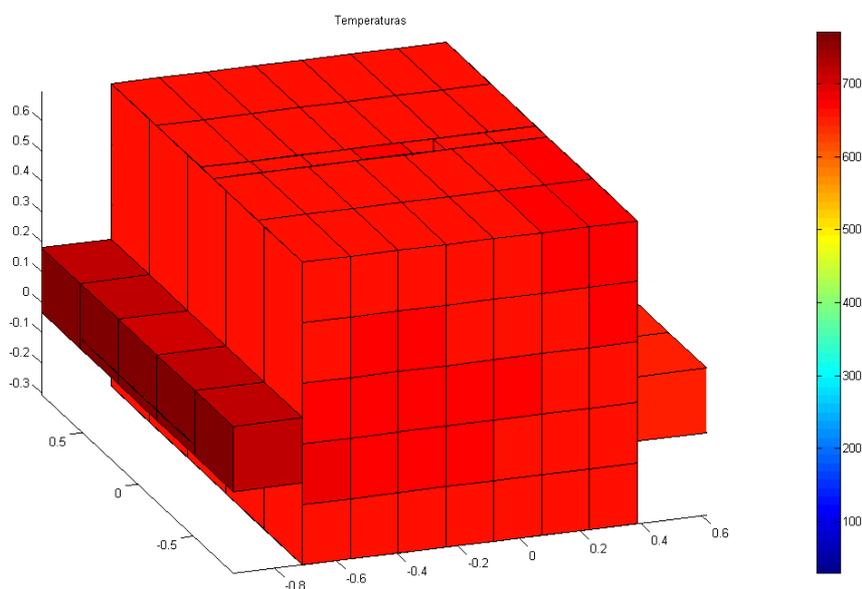


Figura 13. Distribución de temperaturas en el estático.

En este caso, se observa que la distribución de temperaturas es mucho más uniforme y cercana a la temperatura de la chapa. Esto se debe a que no se provocan cambios bruscos de temperatura de la chapa en las zonas vecinas al estático.

En esta posición de la línea, se encuentra actualmente instalado un pirómetro bicolor, que utiliza $\lambda_1=1,55\mu\text{m}$ y $\lambda_2=1,67\mu\text{m}$ aproximadamente con un e-slope de 1,056. Se intenta determinar si es adecuado instalar este tipo de pirómetro en esta posición. Para esto, se hizo variar la temperatura de la boca al horno de tubos radiantes y la temperatura de la chapa (provocando variaciones de la temperatura de equilibrio). Para cada corrida se calcularon la temperatura medida por un pirómetro bicolor y otro monocromático. Los resultados se muestran en la Figura 14, donde la recta representa la medición ideal.

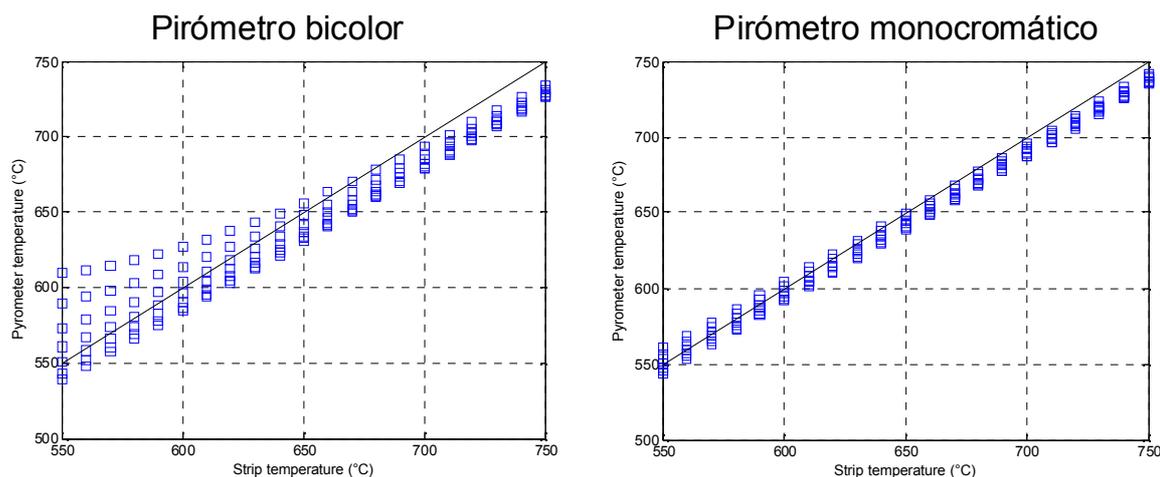


Figura 14. Comportamiento de pirómetro bicolor y monocromático en el estático.

Es evidente que la respuesta del pirómetro bicolor para una temperatura de chapa dada y diferentes condiciones de radiación de fondo tiene una variación importante, que va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura de la chapa. La respuesta del pirómetro monocromático es en cambio mucho menos sensible a los cambios de radiación de fondo.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- La radiación de fondo vista por un pirómetro instalado en la posición vertical proviene principalmente de la zona adyacente al tubo de vista.
- Contar con la información de la radiación emitida por la chapa en distintos rangos del espectro permitiría descomponer la señal del pirómetro en la suma de una contribución de chapa y otra de fondo.
- La precisión de los pirómetros bicolors disminuye cuando la radiación de fondo es importante. Por esta razón no es aconsejable instalar este tipo de pirómetros en posiciones superiores del horno, ya que son las más expuestas a la radiación de fondo.
- El valor real de emisividad de la chapa y su variación sigue siendo un problema, que no admite un enfoque completamente teórico, y requiere posiblemente de una medición on-line.

Trabajo futuro y recomendaciones

Verificar que los instrumentos instalados sean los adecuados en función de las características de cada posición de la línea (tipo, longitud de onda, tubo de vista, posición superior/inferior, etc).

Instalar una termocupla en la zona adyacente al tubo de vista para medir la temperatura del refractario y corregir la lectura del instrumento.

Verificar el estado actual de los tubos de vista. Corroborar el buen estado del refractario que los recubre.

Analizar posibles modificaciones de los tubos de vista para disminuir la radiación de fondo vista por el pirómetro. Por ejemplo, una brida metálica de mayor diámetro en la parte inferior del mismo.

Analizar del funcionamiento de pirómetros de múltiples longitudes de onda (multi-wavelength pyrometers) y su potencial utilización en las diferentes posiciones de los hornos de recocido continuo.

Realizar un estudio estadístico de la emisividad de las chapas que se procesan en la línea según su procedencia y sus dimensiones.

Referencias:

- [1] – Land, Combustion & Environmental Monitoring. <http://www.landinst.com/>
- [2] – Theory and Practice of Radiation Thermometry, D.P. DeWitt, G. D. Nutter. Wiley, 1988.
- [3] - Thermal Radiation Heat Transfer. R. Siegel, J. R. Howell. Taylor & Francis, 4th ed., 2001.
- [4] - J. Etcheverry, no publicado.