

PIROMETRÍA ACÚSTICA EN HORNOS DE PROCESO

Fernando Medinilla - Alfredo Aguilar
CILP - DTRLA

SINOPSIS

La pirometría acústica consiste en la inferencia de un mapa térmico sobre un plano de corte de un horno, a partir de un conjunto de mediciones de temperaturas promedio a lo largo de diversas trayectorias acústicas. En este sentido, un conjunto de transmisores y receptores acústicos emiten y reciben señales ultrasónicas que recorren una trayectoria dentro del hogar del horno monitoreado. La temperatura promedio está vinculada al tiempo de viaje o vuelo de las ondas de sonido entre los transmisores y receptores.

A partir del mapa térmico es posible establecer las características de las llamas de cada uno de los quemadores, pudiendo determinar los ajustes necesarios para lograr una distribución térmica uniforme. La operación del horno en condiciones de balance térmico trae aparejado una mejor operación, y más importante aún, prolonga el tiempo medio entre fallas.

El trabajo expondrá los principios de la tecnología de pirometría acústica, su configuración típica para hornos de procesos, analizará alternativas y características de implementación, describirá los futuros pasos a seguir en este proyecto, explorará alternativas de asimilación y explotación de esta tecnología.

1.INTRODUCCIÓN: La medición de temperaturas en grandes hornos – Breve perspectiva histórica.

La temperatura de los gases de combustión es un parámetro importante durante el encendido y operación de hornos. Durante la operación, la medición de temperatura en distintas posiciones del hogar y sobre los tubos brinda información importante para evaluar la eficiencia térmica del horno, permitiendo detectar tanto problemas con la distribución de la llama en los quemadores, como problemas de ensuciamiento y alteraciones en los flujos convectivos derivados de ello.

La medición de las temperaturas de piel de tubo es algo común en hornos de proceso y se realiza mediante el uso de termocuplas. Estas mediciones pueden ser utilizadas en estrategias de control, como por ejemplo en el control multivariable de un horno en el que dichas temperaturas son variables controladas para las que el objetivo de control consiste en no superar determinados límites superiores.

Sin embargo, la medición continua de temperaturas dentro del hogar del horno no es algo tan frecuente, por las características de dicho tipo de medición, en el que el punto de medición se encuentra a una distancia considerable de las paredes del horno, y a temperaturas elevadas. Un tipo de sensor utilizado con este fin es la termocupla refrigerada por agua, utilizadas para medir temperaturas por encima de los 540°C. Han sido utilizadas con éxito durante muchos años, pero se tornan imprácticas cuando el ancho del hogar supera los 12 metros, dado que el largo máximo de trabajo es de aproximadamente 7 metros. El uso de este tipo de sensor para determinar la

temperatura promedio en el hogar de un horno requiere de muchas mediciones puntuales realizadas en un corto periodo de tiempo dentro de un mismo plano. Las mediciones individuales son luego promediadas para obtener la temperatura promedio. Este tipo de instrumento es difícil de manejar y mantener, así como el procedimiento de medición es laborioso y complejo.

Una alternativa tecnológica consiste en el uso de pirómetros ópticos, práctica común desde hace varios años para la realización de mediciones puntuales, principalmente en las áreas de combustión. Para un uso confiable, este debe ser sensible a dos o más longitudes de onda. A pesar de su practicidad frente otros tipos de sensores, como las termocuplas, los pirómetros ópticos no han sido adoptados por la industria como elementos de medición continua en hornos.

La utilización de técnicas de medición de temperaturas en gases calientes basadas en la medición de la velocidad de propagación de ondas sonoras entre uno o varios transmisores y receptores fue desarrollado en el año 1983, en el ámbito de la industria de generación eléctrica Europea (Green and Woodham, 1983, Green, 1985, Central Electricity Generating Board) y en Estados Unidos en 1986 (Nuspl, S. P.). El principio físico sobre el que se basa es aquel que relaciona la temperatura del aire con la velocidad de propagación del sonido, como será explicado luego. Entonces, midiendo el tiempo de viaje de una onda de sonido entre dos puntos, es posible inferir la temperatura promedio del aire a lo largo de la trayectoria.

Esta técnica no invasiva permitió realizar la medición continua de la temperatura de los gases de combustión en ambientes hostiles como los existentes en los grandes hornos utilizados en muchas plantas de generación eléctrica, que utilizaban carbón como combustible, lo que producía un ambiente con mucho hollín.

A pesar del gran nivel de ruido de fondo asociado al proceso de combustión, turbulencia y ensuciamientos de los sensores, la medición de temperatura fue posible hasta cerca de los 1000 °C sobre caminos de entre 10 a 20 metros. El sistema original de Nuspl estaba instalado en forma permanente en aproximadamente veinte plantas de generación eléctrica sobre caminos promedio de 27 metros. El equipamiento utilizado para 1988 estaba limitado en el largo del camino sónico, fundamentalmente por la magnitud del ruido acústico de fondo.

A partir de las mediciones de temperaturas promedio realizadas sobre distintos caminos en un determinado plano, es posible reconstruir un perfil de temperaturas de dicho plano, y con este poder monitorear distintos aspectos del proceso de transferencia térmica y combustión.

Un aspecto clave en este tipo de tecnología es la medición del tiempo de viaje de la onda de sonido, en un ambiente de mucho ruido, que dificulta la detección de la llegada de la onda. Los primeros pirómetros emitían pulsos de sonido, siendo su potencia la variable utilizada para compensar el ruido de fondo. El avance en la electrónica permitió el uso de señales sónicas más complejas, como la emisión simultánea de señales de varias frecuencias, o la emisión de señales del tipo aleatorias. Esto trajo aparejado una mayor exactitud, velocidad y confiabilidad de los equipos.

2.Fundamentos de la tecnología de la pirometría acústica

La temperatura del gas es uno de los parámetros más importantes a medir en una gran variedad de procesos industriales. Por ejemplo, el diseño progresivo y la operación de calderas alimentadas por carbón, aceite, petróleo, gas natural, sustancias químicas recuperadas y de materia de desecho, depende cada vez más de la supervisión crítica y la evaluación de condiciones de temperatura del gas en el horno.

La operación adecuada de las calderas y hornos, así como la optimización de su funcionamiento requieren del monitoreo de temperaturas y de una combustión apropiada y completa de los diversos combustibles involucrados. Pequeños niveles de sobre-temperaturas a los que está sujeto cualquier tubo de caldera, causa reducciones en el correspondiente tiempo de vida del equipo, y consecuentemente disminuye los índices de disponibilidad de la unidad, además de las reparaciones por interrupción forzada. Una medición directa y exacta de la temperatura de gas puede proporcionar un valioso control de gastos, así como la información para el diseño y la operación de calderas y hornos.

La velocidad de propagación del sonido en un medio depende de determinadas condiciones del mismo, lo cual es utilizado como principio de funcionamiento de diversos instrumentos de medida. En los instrumentos que miden distancia entre un emisor y un receptor, calculando para ello el tiempo de viaje de la onda sonora entre los dos puntos, se asume que la velocidad de propagación en el medio permanece constante. En este caso, cualquier variación de dicho parámetro afectará la exactitud de la medición de distancia. A partir de la medición de distancia se puede medir, por ejemplo, el nivel de líquido en un recipiente o en un tanque.

En los instrumentos que miden caudal por ultrasonido, se aprovecha el hecho de que el sonido que recorre un camino a través de un fluido en movimiento, completa su recorrido en menos tiempo cuando lo hace en su mismo sentido de movimiento, y en más tiempo cuando recorre al fluido en sentido contrario a su movimiento. Luego, es posible relacionar ambos tiempos de viaje para obtener la velocidad del fluido.

En la medición de temperatura, se aprovecha el hecho de que la velocidad de sonido es también una función de la temperatura del medio por el cual se desplaza la onda sonora. La velocidad de propagación del sonido (c) en un gas se relaciona con la temperatura (T) del mismo a través de la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{rRT}{M}} = k\sqrt{T} \quad (1)$$

en la cual:

r : ratio del calor específico del gas a una presión constante dentro de un volumen constante

R : constante universal del gas (8.314 J/K-mol)

M : peso molecular del gas (kg/mol)

Básicamente, conocidas todas estas constantes, **la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura del gas.**

En teoría, un pirómetro acústico simplemente requiere de una fuente de sonido (el transmisor), colocado en un lado del horno, y un receptor o micrófono ubicado en el lado opuesto. El transmisor emite un pulso de sonido y el receptor lo detecta. Midiendo el tiempo requerido por la onda de sonido para viajar desde el transmisor al receptor, y siendo la distancia conocida y constante, podemos calcular la temperatura promedio del gas en la trayectoria recorrida por el pulso acústico.

Este método, sin embargo, es un desafío en la práctica. Por ejemplo, ha sido determinado que la gama de frecuencia práctica para un pulso acústico en el interior de un horno de gran capacidad está entre 500 Hz y 3000 Hz, que corresponde al espectro audible para el ser humano. Esto implica que el pulso de sonido estará enmascarado por el ruido de combustión propio del horno.

También, mientras la temperatura del gas involucrado puede extenderse hasta 1500 °C, la velocidad acústica puede estar por encima de 880 m/s, y la longitud de onda de la señal es aproximadamente de 1 m. El tiempo de vuelo del pulso de sonido debe ser dispuesto en una fracción de longitud de onda para obtener la resolución práctica de la temperatura y una certeza aceptable del sistema. Los problemas también surgen porque la trayectoria acústica por lo general es distorsionada por severas variables térmicas y de velocidad así como por cavidades entre bancos de tubo ubicados en varios puntos a lo largo de un Horno de Proceso o de una Caldera.

La velocidad de sonido (c) es determinada midiendo el tiempo (t) de vuelo de una onda acústica, luego dividiéndolo por la distancia (d) que viajó:

$$c = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Una vez conocida la velocidad del sonido, la temperatura puede ser calculada combinando las ecuaciones (1) y (2) dando como resultado una expresión que relaciona la temperatura del gas con la distancia y el tiempo de vuelo:

$$T = \left(\frac{d}{Bt} \right)^2 - 273,16$$

donde:

T: temperatura del gas en °C

d : distancia en metros

B: constante acústica del gas $\sqrt{\frac{rR}{M}}$ en unidades SI

t: tiempo de vuelo en segundos

Para medir la temperatura del gas en un horno, la distancia (d) entre el transmisor acústico y el receptor es constante y fácilmente determinada. La constante acústica (B) es calculada a partir de un análisis del combustible o de su gas, y el tiempo de

vuelo (t) es medido por el pirómetro acústico. Con esta información, se calcula la temperatura promedio del gas a lo largo de la trayectoria recorrida.

En la figura 2.1 se puede ver un horno típico de proceso y la disposición de los sensores en un plano de corte superior a la altura máxima de las llamas de combustión. Se muestra una configuración típica de caminos acústicos en el plano de medición de temperatura. Estos caminos quedan determinados por la disposición y distribución de los transmisores y receptores en las paredes exteriores del horno.

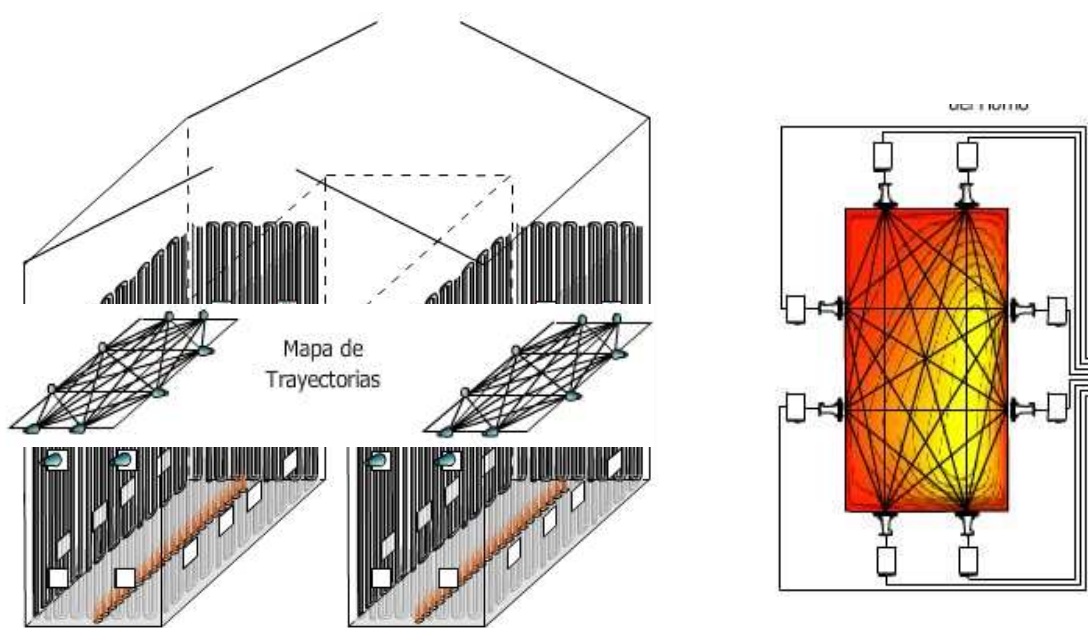


Figura 2.1: esquemático de un horno de dos hogares, y del plano de medición, sobre el que se infiere un mapa térmico y un diagrama de zonas de temperatura.

A partir de las mediciones de temperaturas promedio de cada uno de los distintos caminos acústicos, es posible construir distintos mapas o perfiles térmicos del horno. En la figura 2.2 se puede ver una mapa térmico, en el cual la temperatura es codificada en colores, y sobre el que también se despliegan curvas isotérmicas.

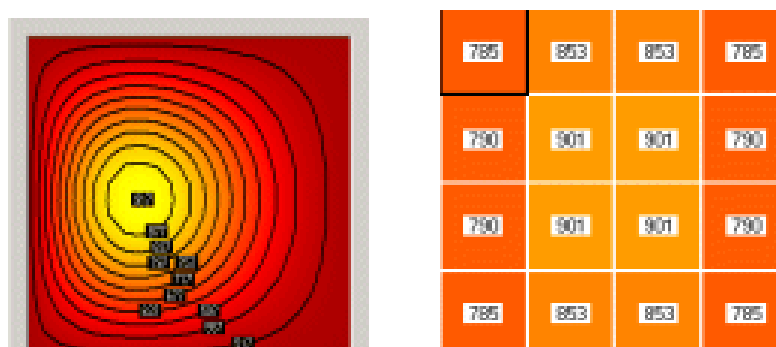


Figura 2.2: izquierda: mapa térmico en el que se pueden visualizar isoterma, derecha: mapa con zonas de temperatura.

En la misma figura se muestra un mapa de zonas de temperatura, para lo cual se ha realizado una cuantificación del mapa térmico continuo, a los efectos de contar con un

conjunto finito de mediciones de temperaturas que permita implementar alguna estrategia de control sobre el horno.

En la figura 2.3 se muestra una foto de un transmisor sónico a instalar sobre una boca de inspección en la pared del horno.



Figura 2.3: foto de un transmisor sónico.

3. CONCLUSIONES: Uso de un pirometro acústico en el control rutinario de hornos de proceso

Horno BA-1801 - Complejo Lubricantes de Refinería La Plata.



Figura 3.1: horno de Topping D del Complejo Lubricantes.

Las tareas de control rutinarias de un horno de proceso contemplan la realización de numerosas rutinas de verificación, en las que otrora contaba con un Operador dedicado, “El Foguista”

El uso de la tecnología descrita en el presente trabajo le permite al Operador del Horno disponer, en la Sala de Control, de una visualización del mapa térmico inferido sobre un plano horizontal en cada semi-hogar del horno, por sobre la altura de las llamas, como puede verse en la próxima figura.

Es importante destacar que el uso de esta tecnología no elimina la necesidad de realizar las rutinas típicas de control de llama de los hornos (ajustes de registros, verificación de presiones, etc.), sino que brinda información importante para asegurar su efectividad.

4. DESARROLLO: Uso de un pirómetro acústico en un lazo de control automático de hornos de proceso

El primer paso en el uso de un pirómetro acústico consiste en la realización de mediciones continuas de temperaturas en el hogar de un horno, cálculo y despliegue de un mapa térmico y de zonas de temperatura, a partir de los cuales pueda supervisarse la operación de la unidad.

Un posible segundo paso consiste en cerrar un lazo de control de balance térmico. En la evaluación de alternativas se ha considerado la posibilidad de regular en cierto rango la distribución de gas combustible a los quemadores de un horno para lograr una temperatura homogénea en el mismo. En la figura 4.1 se muestra un diagrama esquemático sencillo de esta alternativa.

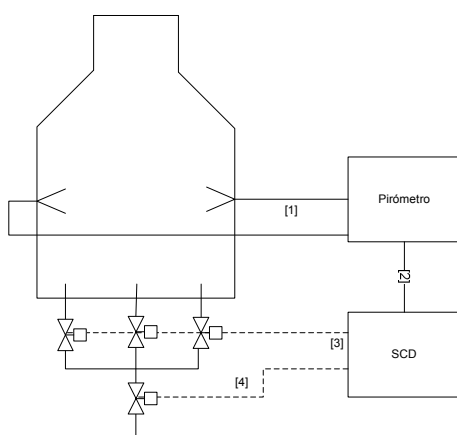


Figura 4.1: esquemático sencillo de la opción de control a lazo cerrado.

Un equipamiento electrónico específico realizará la medición de temperaturas y el cálculo del mapa térmico. Esta información será enviada al DCS [2] en el que se implementará una estrategia de control que comandará un conjunto de válvulas de control o balanceadoras [3]. El objetivo de estas válvulas será sólo la de redistribuir el caudal de gas principal entre los quemadores, con el fin de uniformar las temperaturas en el hogar del horno. El control principal de gas combustible y de temperatura de salida del producto del horno se continuará realizando con la válvula de combustible principal a través de un lazo de control independiente [4].

En la figura 4.2 se detalla la arquitectura del sistema, indicando aquellos equipos que serán provistos como parte del proyecto.

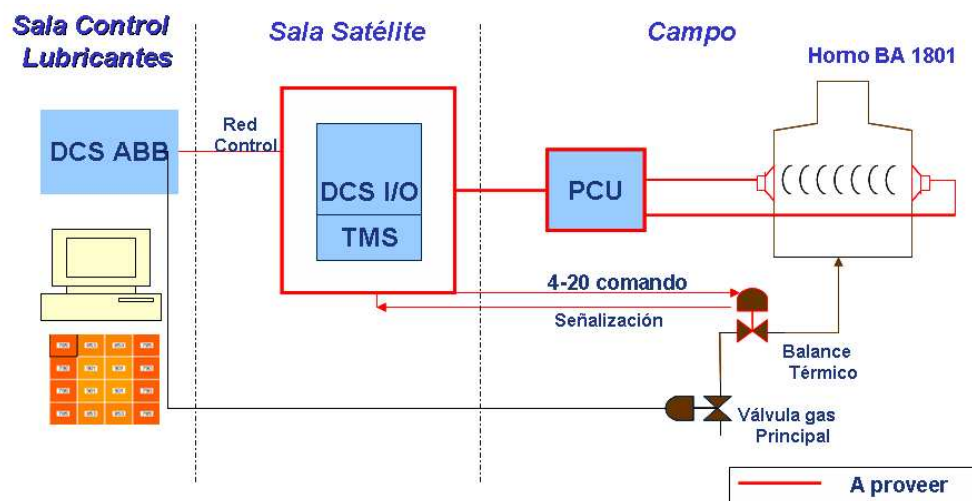


Figura 4.2 : detalle de la arquitectura del sistema.

La aplicación de control deberá contemplar un modo de funcionamiento automático, el cual realizará ajustes a las válvulas de control para balancear o equilibrar la temperatura de las zonas.

Asimismo, la aplicación de control deberá permitir que un usuario retire de la lógica de control zonas de temperatura. De esta manera el control no deberá actuar sobre las correspondientes válvulas, y no considerará la temperatura de dichas zonas en el cálculo del promedio. Se considera que este modo de control será necesario cuando por razones operativas haya que modificar la temperatura en determinada zona del horno. Por último, deberá ser posible sacar de servicio toda la estrategia de control.

5. Proyecto de instalación de un pirómetro acústico en CILP

En el proyecto “Pirometría Acústica en el BA-1801 del Topping D” se dispondrá de 20 transceptores, y a partir de las trayectorias originadas en los mismos podremos acceder desde el DCS o desde una PC dedicada, a dos tipos de información, a saber:

- Un mapa térmico con valores puntuales de temperatura por zonas, que representará un valor de temperatura para c/ quemador, para la identificación on-line de desequilibrios de temperatura. Como por ejemplo, por un inadecuado funcionamiento de un quemador, que genere acción directa de las llamas sobre los tubos, podría ocasionar potenciales puntos calientes.
- Una curva Isotérmica, que nos permite visualizar zonas más calientes de cada semi-hogar, con una visión global de los mismos, y además nos permite diagnosticar el estado operativo del Horno y mejorar el rendimiento de la Unidad.

La lógica de control balanceará los quemadores, dejando el control de temperatura del horno, así como la seguridad operativa de la Unidad, a la lógica principal.

La unidad sobre la que se realizará este proyecto, es capaz de procesar 12.000 M³/día de crudo NRN, pero debido a varios factores, la carga útil del horno es inferior a la de diseño, aumentando esta diferencia a medida que pasa el tiempo, para nuevamente recuperar su capacidad tras el Paro Programado de la Unidad.

Con la tecnología de la pirometría acústica, lo que se busca es balancear las temperaturas dentro del hogar del horno, para evitar o disminuir los efectos que este desbalanceo produce (zonas más calientes).

Esta disminución de efectos negativos sobre el horno, repercutirá en un mayor aprovechamiento del mismo, con el consiguiente aumento de beneficios por la disminución del lucro cesante.

El proyecto total tendrá un costo de 945 KUS\$, y comenzará a ser rentable si se logra un aumento de la carga del horno, solo un 0,14 % superior a lo que sucede en la actualidad. Si las mejoras son superiores, y sin pretender maximizar este análisis, se conseguirían rentabilidades mayores al 100 %. Esto puede verse en la figura 5.

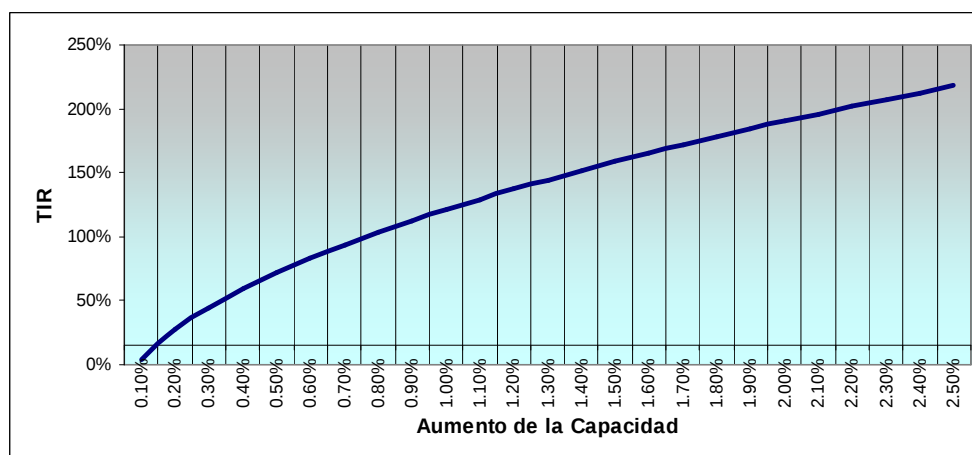


Figura 5: variación del TIR del proyecto en función del aumento de la carga al Horno.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Para un entendimiento general del uso de la tecnología del ultrasonido, tanto en la medición de temperatura, como de muchas otras variables físicas: *Ultrasonic Measurements for Process Control – Theory, Techniques, Applications*, L.C. Lynnworth, Academic Press. ISBN 0-12-460585-0.

[2] Para conocer el detalle técnico de las distintas alternativas desarrolladas, se puede consultar la base datos de patentes de los Estados Unidos <http://www.uspto.gov/> En este sitio se puede tener acceso libre al texto de patentes americanas, buscando por las siguientes referencias:

PIROMETRÍA ACÚSTICA

Steven Nuspl de la **The Babcock & Wilcox Company**
(<http://www.babcock.com/>):

Nº Patente Título

[6,859,063](#) [Transpinnor-based transmission line transceivers and applications](#)

[5,423,140](#) [Two-sided display](#)

[5,351,655](#) [Acoustic emission signal collector manifold](#)

[4,848,924](#) [Acoustic pyrometer](#)

[4,388,691](#) [Velocity pressure averaging system](#)

John Kleppe de la de **Scientific Engineering Instruments, Inc.**
(<http://www.sciengr.com/>):

Nº Patente

Título

[5,404,833](#) [Self-purging pneumatic acoustic generator](#)

[5,392,645](#) [Method and apparatus for flow rate measurement](#)

[5,349,859](#) [Method and apparatus for measuring acoustic wave velocity using impulse response](#)

PIROMETRÍA OPTICA

Diamond Power Specialty Company (<http://www.diamondpower.com/>):

[7,001,067](#) [Pyrometer for measuring the temperature of a gas component within a furnace](#)

[6,733,173](#) [Pyrometer for measuring the temperature of a gas component within a furnace](#)

7. Agradecimientos

Durante esta fase de ingeniería conceptual del proyecto, participaron distintos sectores, entre los que debemos mencionar a Operaciones del Complejo Lubricantes del CILP, Eduardo Hourqueby y el apoyo de todo el Grupo I de este Complejo, CAS – Esteban Nigro y Bernardo Donato- Mantenimiento/Paros Fabián Bauchet y Ricardo Pícoli, Verificación de Equipos Eduardo Aguilera y de la DTRL Y Carlos Ramirez. A través de diversas reuniones se fue consensuando el alcance del Proyecto y se analizaron diversas propuestas de posibles proveedores.