

PROYECTO INTEGRADOR  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**APLICACIÓN DE LA TEORÍA DEL RUIDO Y  
VIBRACIONES EN SISTEMAS INDUSTRIALES  
DE FABRICACIÓN**

**Gustavo Marcelo Castelluccio**

Director

**Dr. Oscar García Peyrano**

Instituto Balseiro  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Universidad Nacional de Cuyo

Junio 2005

## Resumen

El presente proyecto integrador trata sobre técnicas de detección y control de desbordes de escoria incandescente en convertidores B.O.F. (Basic Oxygen Furnace), por medio de la medición en línea de vibraciones y ruido. Estos derrames suelen ocurrir frecuentemente en el proceso de refinación del acero y son perjudiciales para los índices de producción.

La técnica de análisis de la señal de sonido proveniente del convertidor es aquella que fue finalmente elegida. Este método requiere de la medición del sonido de gases a altas temperaturas. Para ello se diseñó un prototipo que permite registrar el sonido en atmósferas a muy alta temperatura (del orden de los 1000 °C) y en condiciones corrosivas.

Se llevaron a cabo los ensayos de validación de conceptos que resultaron satisfactorios en escala de laboratorio. El equipo de medición logró registrar el sonido de gases a  $850 \pm 50$  °C en forma confiable.

Palabras clave: Alta temperatura, convertidor BOF, desbordes, escoria, ruido, sonido.

## Abstract

This work discusses different techniques for the detection and control of incandescent slag slopping in B.O.F. converters (Basic Oxygen Furnace), using on line measures of vibrations and noise. The slag slopping usually occurs during the process which refines the steel and it goes against the production indexes.

It was chosen for this work the technique which analyzes the sound coming from the converter. The method requires to measure the sound in gases at high temperatures. For fulfill this requirement it was designed a prototype that allows to take the sound signal from atmospheres at very high temperature (the order of 1000 °C) and in corrosive conditions.

There were carried out test in laboratory scale to validate the concepts proposed and the results were satisfactory. The equipment for measuring allowed recording the sound in gases at  $850 \pm 50$  °C in a trustable manner.

Keywords: High temperature, BOF Converters, slopping, slag, noise, sound.

## Dedicatoria

A mi familia, por la libertad incondicional, su guía, apoyo y comprensión.

A P. por estar, aceptarme y señalarme el centro.

## CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
I - 1 HISTORIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACERO POR REDUCCIÓN CON OXÍGENO.....	1
I - 1.1 <i>El funcionamiento del convertidor</i> .....	2
I - 1.2 <i>El control de los convertidores</i> .....	6
I - 1.2.1 Importancia de un control eficaz.....	6
CAPÍTULO II ANÁLISIS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN.....	8
II - 1 MÉTODOS UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD.....	8
II - 1.1 <i>Ventajas y desventajas de cada método</i> .....	9
II - 1.2 <i>Otros métodos analizados</i> .....	10
II - 2 MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE RUIDO EN LOS GASES DE ESCAPE.....	12
II - 2.1 <i>Características del ambiente de trabajo</i> .....	12
II - 2.1.1 Filosofía de diseño.....	13
CAPÍTULO III DESARROLLO TEÓRICO.....	16
III - 1 CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR AL MEDIO, DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS Y MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN.....	16
III - 1.1 <i>Material del conector</i> .....	16
III - 1.2 <i>Modelo de la transferencia de calor</i> .....	17
III - 1.2.1 Modelo de conducción del calor en aletas.....	18
III - 1.2.2 ¿Es razonable utilizar el criterio de conducción unidimensional?.....	22
III - 1.2.3 Aplicación del modelo de la aleta.....	23
III - 1.2.4 Estimación del tiempo de establecimiento del estado estacionario.....	27
III - 2 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DEL SONIDO TRASMITIDA AL MICRÓFONO, AMORTIGUAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN.....	28
III - 2.1 <i>Modelo unidimensional</i> .....	28
III - 2.1.1 ¿Cómo se entiende que en la transición a un medio más rígido la onda de presión duplique su intensidad?.....	30
III - 2.1.2 ¿Qué ocurre en el caso del conector de alúmina?.....	30
III - 2.2 <i>Modelo Bidimensional</i> .....	32
III - 2.3 <i>Estimación de la frecuencia máxima de trabajo</i> .....	33
III - 2.4 <i>Principio de funcionamiento</i> .....	36

CAPÍTULO IV	IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO Y ENSAYOS.....	37
IV - 1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROTOTIPO. ....	37
IV - 2	DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	39
	• <i>El cerámico y su alojamiento</i> .....	39
	• El micrófono y su electrónica.....	40
	• La fuente de calor.....	41
	• El montaje.....	41
IV - 3	EL ENSAYO.....	41
	<i>IV - 3.1 El calentamiento</i> .....	43
	<i>IV - 3.2 Otras comprobaciones</i> .....	46
	• Mayor calentamiento.....	46
	• Comportamiento frente a frecuencias altas.....	47
	• Direccionalidad.....	47
	• Otras pruebas.....	48
CAPÍTULO V	EVALUACIÓN DE LA INNOVACIÓN Y ETAPAS FUTURAS.....	49
V - 1	RECAPITULACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO.....	49
V - 2	¿ES EL PRESENTE TRABAJO UNA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA?.....	49
	<i>V - 2.1 ¿Cual es la razón por la cual una industria puede demandar una</i> <i>innovación?</i> .....	50
	<i>V - 2.2 Resguardo de la propiedad intelectual</i> .....	51
V - 3	ETAPAS FUTURAS.....	51
	<i>V - 3.1 Análisis del sonido proveniente del convertidor</i> .....	51
	V - 3.1.1 El estado del arte.....	52
	V - 3.1.2 ¿Que métodos de análisis se podrían emplear?.....	53
	V - 3.1.3 La emulsión.....	54
	V - 3.1.4 La interacción de la emulsión con el sonido.....	55
	<i>V - 3.2 ¿Como se podría subsanar el hecho que no se detecten los cambios en la</i> <i>frente se sonido?</i> .....	57
CAPÍTULO VI	CONCLUSIONES.....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ETAPAS DE PRODUCCIÓN DEL ACERO CON UN CONVERTIDOR BOF. REF. [1] .....	2
FIGURA 2. ESQUEMA DE UN CONVERTIDOR BOF. REF. [1].....	3
FIGURA 3. EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LA ESCORIA. REF. [5].....	4
FIGURA 4. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO DEL BAÑO A LO LARGO DEL PROCESO. REF [5] .....	4
FIGURA 5. CANAL POR EL CUAL CIRCULA LA INFORMACIÓN DESEADA AL MEDIR LAS VIBRACIONES DE LA LANZA DE OXÍGENO. EL RECUADRO RESALTADO INDICA EL ORIGEN DE LA INFORMACIÓN. ....	9
FIGURA 6. CANAL POR EL CUAL CIRCULA LA INFORMACIÓN DESEADA AL MEDIR EL SONIDO EN LA BOCA DEL CONVERTIDOR. EL RECUADRO RESALTADO INDICA EL ORIGEN DE LA INFORMACIÓN. ....	10
FIGURA 7. ESQUEMA DEL CONDUCTO DE ESCAPE DE LOS GASES DEL CONVERTIDOR. ....	13
FIGURA 8. GRAFOS DE LA ENERGÍA TÉRMICA. ....	14
FIGURA 9. GRAFOS DE LA ENERGÍA ELÁSTICA Y DE LA TRANSFORMACIÓN A ENERGÍA ELÉCTRICA. ....	15
FIGURA 10. ESQUEMA DEL CONECTOR REFRIGERADO POR AIRE. ....	18
FIGURA 11. BALANCE DE ENERGÍA TÉRMICA ENTRE EL CALOR TRANSMITIDO POR CONDUCCIÓN Y EL EXTRAÍDO POR CONVECCIÓN. ....	18
FIGURA 12. ESQUEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR. ....	22
FIGURA 13. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA ALÚMINA CON LA TEMPERATURA. REF.[9] .....	23
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA A LO LARGO DEL CONECTOR CERÁMICO. ....	24
FIGURA 15. ESQUEMA DE LA INTERFAZ ENTRE DOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN DEL SONIDO DIFERENTES. ....	28
FIGURA 16. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN LA ALÚMINA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. REF. [14].....	31
FIGURA 17. ESQUEMA DE UNA ONDA DE SONIDO INCIDIENDO EN FORMA OBLICUA. ....	32
FIGURA 18. ESQUEMA DE LA DESCOMPOSICIÓN DE UNA ONDA DE SONIDO. ....	32
FIGURA 19. PLANO CONSTRUCTIVO DEL INSTRUMENTO ENSAYADO. ....	37

FIGURA 20. CAÑO METÁLICO PARA ALOJAR EL CERÁMICO. NÓTENSE LOS AGUJEROS DE SALIDA DEL AIRE REFRIGERANTE.....	39
FIGURA 21. MICRÓFONO UTILIZADO. NÓTESE LA MALLA DE BLINDAJE.....	40
FIGURA 22. ESQUEMA DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO UTILIZADO PARA ACONDICIONAR LA SEÑAL DEL MICRÓFONO. ....	40
FIGURA 23. SEÑAL DE CALIBRACIÓN CAPTADA POR EL MICRÓFONO. ....	42
FIGURA 24. FOTOGRAFÍA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL. NÓTESE EL EXTREMO DEL CERÁMICO INCANDESCENTE Y LA PROTECCIÓN PARA ESTABILIZAR LA LLAMA.....	44
FIGURA 25. FOTOGRAFÍA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	44
FIGURA 26 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL MICRÓFONO A LO LARGO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO.....	45
FIGURA 27. VISTA FRONTAL DEL CERÁMICO. ....	45
FIGURA 28 DETALLE DEL CERÁMICO Y DEL PARLANTE.....	45
FIGURA 29. SEÑAL DEL MICRÓFONO AL SER SOMETIDO A TEMPERATURA Y EL PARLANTE EMITIENDO A 500 Hz.....	46
FIGURA 30. SEÑAL REGISTRADA CON EL MICRÓFONO AL SER SOMETIDO A TEMPERATURA Y EL PARLANTE EMITIENDO UNA SEÑAL SINUSOIDAL DE 5000 Hz.....	47
FIGURA 31 . EJEMPLO DEL ESPECTRO DE FOURIER POR VENTANAS DEL SONIDO REGISTRADO EN UN CONVERTIDOR. REF .[16] .....	52
FIGURA 32. MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE SONIDO MÁS SENCILLO DESDE EL MICRÓFONO HASTA LLEGAR AL OPERARIO DEL CONVERTIDOR.....	53
FIGURA 33. MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE SONIDO UTILIZANDO VARIAS BANDAS DE FRECUENCIAS PREDETERMINADAS Y PRESENTADAS EN FORMA SEPARADA. ....	54
FIGURA 34. MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE SONIDO COMBINANDO CON LA INFORMACIÓN REGISTRADA EN LA LANZA.....	58



## Capítulo I

### **Introducción**

#### I - 1 Historia del proceso de producción de acero por reducción con oxígeno.

El proceso de fabricación del acero mediante la reducción con oxígeno proviene del convertidor Bessemer original, proceso patentado por Sir Henry Bessemer en 1856 [1]. En aquella época el oxígeno no estaba comercialmente disponible por lo que se utilizaba aire como oxidante. El proceso consistía en soplar aire a través de unos orificios en la parte inferior de un crisol, que contenía el metal líquido que se deseaba reducir [2].

A pesar de que la idea original consideraba el uso de oxígeno puro en vez de aire [3], esta posibilidad se retrazó hasta que su costo se hizo razonable. En la década de 1930 se comenzó con el enriquecimiento del aire con oxígeno hasta que la segunda guerra mundial impulsó la tecnología del oxígeno y abarató sus costos, haciendo viable su uso. Este avance se vio detenido porque los orificios de ingreso del aire no resultaban apropiados para el uso de oxígeno puro. La solución apareció hacia finales de la década de 1940 en Suiza, donde se propuso inyectar el gas con una lanza desde la parte de arriba del recipiente. El primero de estos prototipos de 35 toneladas y oxígeno puro fue comercializado por Voest en Linz, Austria, en 1952.

Este nuevo proceso fue denominado "LD" ya que los primeros ensayos se realizaron en las ciudades de Linz y Donawitz. Gracias a su gran productividad, el nuevo proceso fue aceptado globalmente y permitió reconstruir la industria metalúrgica europea de la post-guerra. Del mismo modo, la industria japonesa se convirtió a la nueva tecnología instalando sus primeras unidades en Yawata en 1957.

En Estados Unidos las primeras instalaciones aparecieron en 1954 y con el tiempo su industria anticuada de 130 millones de toneladas se transformó a los nuevos convertidores. Recién en 1969 la producción de acero utilizando convertidores LD superó al resto de los métodos de producción.

Cabe remarcar que no fueron menores las acciones legales sobre los derechos de la patente del proceso y del diseño de la lanza, que rápidamente pasó de un solo orificio de salida del oxígeno a múltiples agujeros.

La tecnología evolucionó hasta desarrollar los actuales convertidores que poseen una lanza que sopla oxígeno (BOF- Basic Oxygen Furnace) y un sistema que insufla gases inertes por debajo y se los denomina de soplo combinado (LBE). Hoy en día un convertidor de 250 toneladas necesita cerca de 20 toneladas de oxígeno cada 40 minutos. Además, son de vital importancia para la industria ya que el 55% de la producción mundial de acero se realiza en convertidores BOF [4].

### I - 1.1 El funcionamiento del convertidor

El convertidor BOF es un crisol recubierto de material refractario al cual se le introduce un 80 % de arrabio líquido y un 20 % de chatarra por la parte superior y se le insufla oxígeno en su interior para reducir los metales. Típicamente posee 10 metros de alto, 8 metros de diámetro y un recubrimiento cerámico que puede llegar a 1 metro de espesor. La operación de carga dura unos minutos y requiere que se incline el convertidor. *A posteriori* se vuelve a la posición vertical para comenzar el soplado. La Figura 1 muestra las distintas etapas y posiciones del proceso de producción.



Figura 1. Etapas de producción del acero con un convertidor BOF. Ref. [1]

El oxígeno de pureza superior al 99.5% es inyectado a través de una lanza que se introduce dentro del convertidor. La lanza es un elemento de extrema importancia ya que la turbulencia producida influye en la rapidez con la que se desarrollaran las combinaciones químicas. Su longitud es típicamente de 20 m y los diseños más modernos poseen múltiples agujeros, que liberan el oxígeno a una velocidad que duplica la del sonido. Otros factores relevantes en el proceso son la altura donde se ubica la lanza respecto del baño metálico y el caudal de oxígeno inyectado a través de ella. De ellos también dependerá la velocidad y eficacia del proceso. (Véase Figura 2).

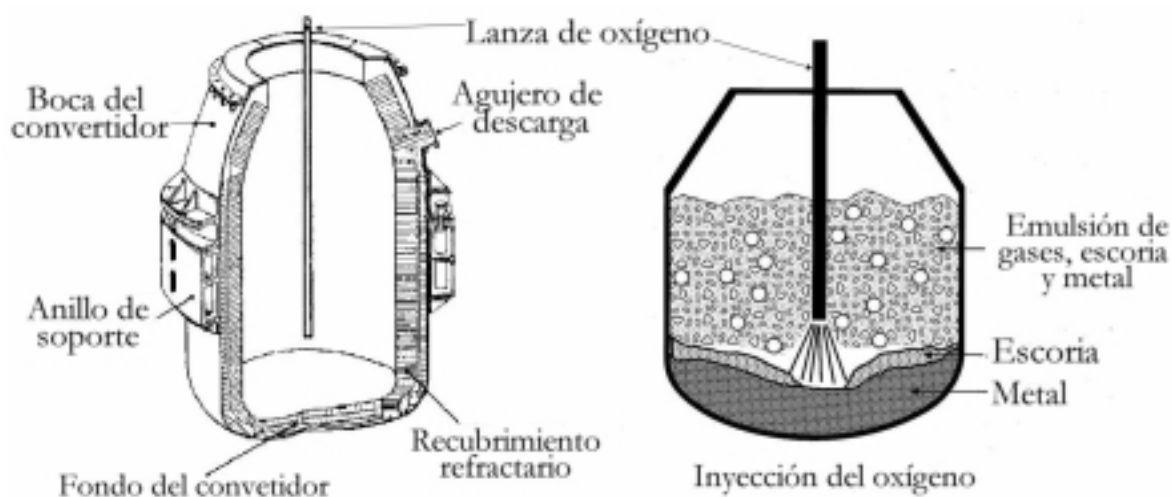


Figura 2. Esquema de un convertidor BOF. Ref. [1]

En el momento en el que comienza el soplado de oxígeno se escucha un chillido agudo. Este sonido es apantallado por el silicio del baño, que se oxida formando sílice ( $\text{SiO}_2$ ), y reacciona generando una escoria líquida gasificada que envuelve la lanza. Esta escoria gasificada o emulsión de escoria es beneficiosa desde el punto de vista metalúrgico ya que genera una gran superficie de contacto entre el metal y el oxígeno, aumentando la rapidez de la reacción química. Para incentivar la formación de la emulsión se agregan químicos que aumentan la tensión superficial, impidiendo que se rompan las burbujas formadas. El gas que se genera es principalmente monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) que proviene de la reacción con el carbono presente en el baño de metal líquido.

La reacción química que ocurre es la siguiente:

El oxígeno comienza a oxidar el hierro y forma óxido férrico,



que en presencia de exceso de hierro se transforma en óxido ferroso,



Este óxido se disuelve en el baño y oxida las impurezas formando sílice y calor



El hierro libre se incorpora al líquido, pero parte del óxido se combina con la sílice formando la escoria que, por ser más liviana, sobrenada el baño,

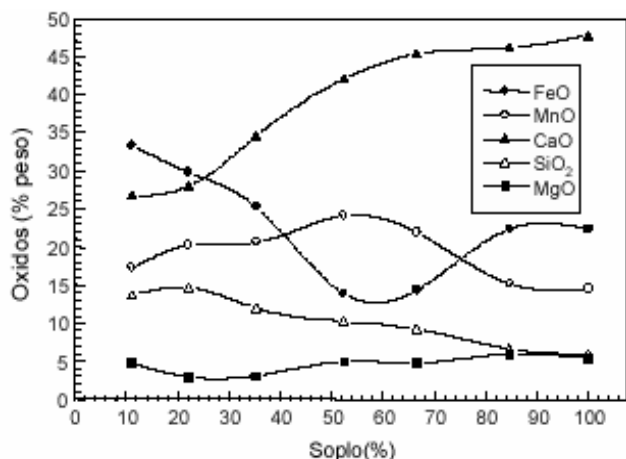


Figura 3. Evolución de la composición de la escoria. Ref. [5]

Existen muchas otras reacciones que también intervienen en el proceso, y que dependen principalmente de la composición de la chatarra o de los elementos incorporados, como por ejemplo la cal. La Figura 3 [5] ejemplifica una evolución típica de los componentes de la escoria en el convertidor a lo largo del proceso de soplado.

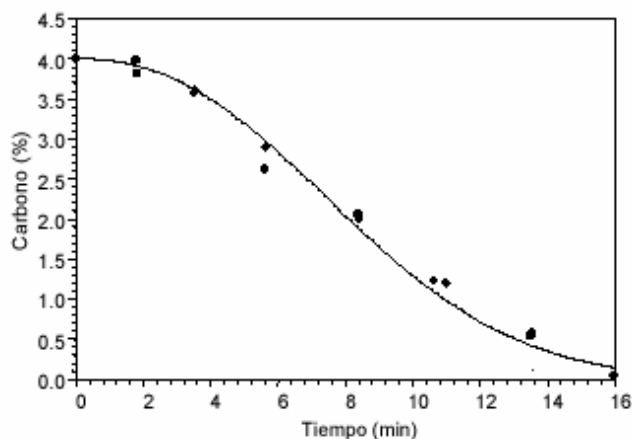


Figura 4. Evolución del contenido de carbono del baño a lo largo del proceso. Ref. [5]

A medida que reacciona el baño la temperatura crece y aumenta la afinidad del carbono por el oxígeno. De allí resulta la formación del óxido de carbono.



Como consecuencia de la combustión del CO aparecen llamas largas por la boca del convertidor



y se advierte un burbujeo del metal fundido, fenómeno que no es más que el paso tumultuoso del CO a través de la masa líquida. Como consecuencia del proceso se producen fuertes vibraciones, que poco a poco se reducen y el fenómeno se aminora.

La Figura 4 ejemplifica la evolución del contenido de carbono del baño a lo largo del proceso de soplado [5]. El proceso termina cuando la concentración de carbono llega al valor deseado, típicamente menor a 0.1 %.

La cantidad de gas generada supera en varias veces al volumen del convertido y resulta frecuente ver derrames de escoria por sobre la boca del convertidor. Nótese en la Figura 1 que el volumen que ocupa la emulsión de escoria es considerablemente mayor al del baño metálico.

La reacción de reducción es exotérmica alcanzándose temperaturas cercanas a 1700 °C, que son suficientes para mantener el metal en estado líquido. Los gases residuales escapan por la boca del convertidor a una temperatura semejante a la del baño y son dirigidos por un conducto para su tratamiento. La temperatura de los gases disminuye por debajo de los 1000 °C en la chimenea de salida.

El soplado continúa por un período predeterminado basado en la estimación de la composición de los materiales cargados y las condiciones del proceso. Típicamente el proceso dura entre 15 y 20 minutos y la altura de la lanza esta generalmente programada para ubicarse en posiciones previamente elegidas.

A continuación se eleva la lanza para poder inclinar el convertidor y así realizar una medición de temperatura y obtener una muestra del acero que será analizada. Esta retroalimentación de información es necesaria para conocer el estado del proceso. Los modelos teóricos no son aún lo suficientemente precisos debido a que no se puede conocer con exactitud la composición del material cargado en el convertidor.

Una vez verificada la calidad del acero se inclina el convertidor nuevamente y se vierte el acero en una cuchara para ser llevado al proceso de laminación. Para evitar el traspaso de escoria se han diseñado ingeniosas trampas que detienen su avance. Por último se retira la escoria y el convertidor queda listo para ser cargado nuevamente.

### I - 1.2 El control de los convertidores

Históricamente los operadores de convertidores han controlado el proceso observando las siguientes características:

- el aspecto de la llama, su color, tamaño y densidad;
- la intensidad del ruido y como varía;
- el color de la escoria, que evidencia su composición;
- el análisis de probetas de ensayo.

Este tipo de control conduce a resultados que dependen parcialmente del operador de turno. La competitividad actual de la industria siderúrgica tiende a disminuir las subjetividades debidas a la intervención humana. Actualmente el control de los convertidores se ha automatizado en gran medida midiendo y estudiando las mismas propiedades que utilizaba el operario. Para tal fin existen dispositivos que miden la composición de los gases de escape y modelos numéricos que permiten predecir, aunque con considerable error, la composición del baño. También se realizan análisis *in situ* de la composición del acero y mediciones del sonido de las cuales se infieren la altura del baño.

#### I - 1.2.1 Importancia de un control eficaz

Un control eficaz implica desarrollar el proceso del convertidor lo más rápido posible, con el menor gasto de insumos y con la mayor seguridad. El desborde de la escoria es un efecto perjudicial para la productividad del convertidor debido a los tiempos muertos asociados y a la pérdida de material, por lo que es deseable minimizar su ocurrencia. Se estima que cerca del 0.5% de la carga del convertidor se pierden anualmente debido a algún tipo de desborde [1].

Por el contrario la necesidad de mejorar los índices de productividad impulsa a incrementar la carga de metales en los convertidores, aumentando con ello la posibilidad de desbordes. De la competencia natural de estos efectos nace la necesidad de conocer el nivel de escoria con precisión y estimar la probabilidad de desbordes.

En lo anterior yace la fuerza impulsora de este proyecto integrador que se propone desarrollar un método para detectar indicios de posibles desbordes de escoria mediante el análisis de las vibraciones y del sonido. Es claro el beneficio obtenido por el operador del convertidor si dispusiese de un sistema de detección eficaz.

Motivado por estas necesidades, el personal de la acería de Siderar S.A. consultó con el laboratorio de vibraciones del Centro Atómico Bariloche en búsqueda de soluciones.

El capítulo a continuación detalla algunas técnicas propuestas para predecir los desbordes de escoria y los progresos en aquella que promete los mejores resultados.

## Capítulo II

### **Análisis del método de medición**

#### II - 1 Métodos utilizados en la actualidad

El intercambio con el personal de la acería y la bibliografía [6] revelaron que en la actualidad existen dos tecnologías que funcionan en plantas siderúrgicas, que intentan evitar los desbordes de los convertidores mediante el estudio de vibraciones. La primera analiza las vibraciones presentes en la lanza de oxígeno ubicando un detector de vibraciones en el extremo superior. Los autores de esta técnica [7] aseguran que se puede correlacionar las aceleraciones sufridas por la lanza con la actividad de la emulsión de escoria. Para ello se coloca un acelerómetro en el extremo de la lanza más lejano al convertidor, donde la atmósfera reinante está controlada. Las vibraciones poseen información del nivel de la emulsión puesto que son un reflejo de la energía cinética de la escoria. La información útil corresponde a las aceleraciones en un plano, típicamente horizontal, que puede variar con el soporte de la lanza. Además se requiere filtrar las ondas que corresponden a los modos normales de vibración de la lanza y su enganche.

La segunda técnica, denominada comercialmente como Sonicmeter® consiste de un dispositivo que registra las señales acústicas en los gases para frecuencias entre 100 y 500 Hz. El ruido registrado proviene del oxígeno que sale de la lanza y se proyecta contra el baño metálico. Las características de este sistema varían desde los más básicos, donde sólo se mide el nivel de ruido y se le presenta su intensidad al operario hasta los más complejos que incluyen asistencia automatizada para el control de la posición de la lanza de oxígeno. Estos últimos requieren una caracterización particular del convertidor a utilizar y un trabajo mancomunado con los metalurgistas especializados.



## II - 1.1 Ventajas y desventajas de cada método

Los métodos se diferencian marcadamente en los ambientes a los que están expuestos los equipos. La lanza está refrigerada por agua y tiene decenas de metros de largo, por lo que la atmósfera en el extremo alejado del convertidor es más fácilmente regulable. Las temperaturas son moderadas lo que permite ubicar acelerómetros comerciales para medir las vibraciones presentes. En cambio, el ambiente que debe tolerar el micrófono que mida el sonido de los gases de escape del convertidor es mucho más hostil y menos controlable.

También difieren en el origen de la información deseada. Para estimar la altura de la emulsión de escoria mediante las vibraciones de la lanza es necesario experimentar con cada convertidor para obtener una señal patrón que sea asociable a posibles desbordes. La información útil es la energía cinética de la emulsión y es conducida por lanza para ser registrada como una vibración. La energía cinética varía según la estructura de la emulsión y las condiciones de soplado. Nótese que además es necesario conocer las frecuencias naturales de la lanza (típicamente menores a 0.5 Hz) para diferenciarlas de las vibraciones producidas por la escoria (típicamente entre 1 y 2 Hz). La Figura 5 muestra el canal por donde circula la información de la energía cinética y como es influenciada por otros factores.

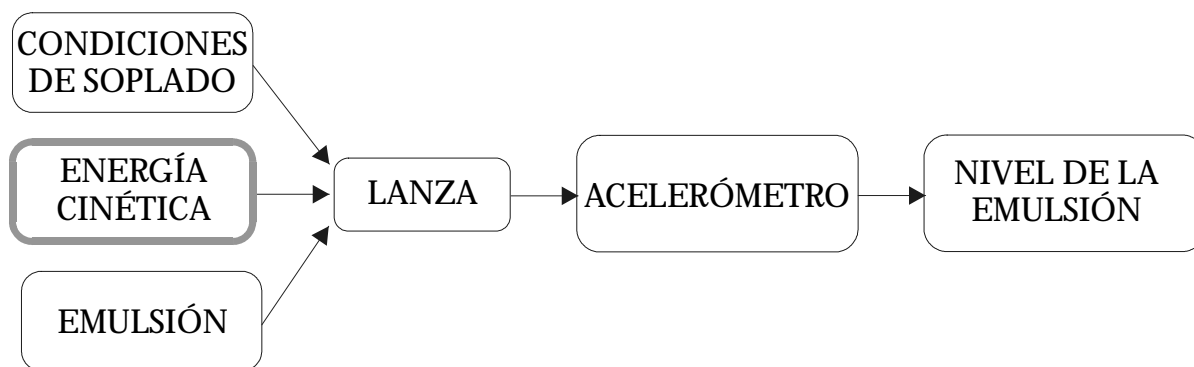


Figura 5. Canal por el cual circula la información deseada al medir las vibraciones de la lanza de oxígeno. El recuadro resaltado indica el origen de la información.

Al medir el nivel de ruido en la boca del convertidor se busca conocer el grado de atenuación del sonido a lo largo del proceso. El ruido generado se modifica con la altura de la emulsión de escoria y además es influenciado por las

condiciones del soplado y de la emulsión. La Figura 6 muestra como es afectada la información del sonido y en qué etapa es atenuado. Nótese que en este caso la información útil (es decir, la magnitud de la atenuación del sonido) es generada más “cerca” del transductor, que en el caso de las vibraciones en la lanza. De este análisis y basándose en los conceptos fundamentales de la teoría de la información, se puede esperar que en cada etapa disminuya la información transmitida, es decir, que aumente su entropía. Luego, cuantas menos etapas intermediarias existan entre la creación de la información y el transductor, menor será la entropía de la señal medida.

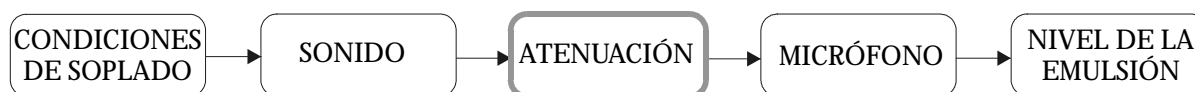


Figura 6. Canal por el cual circula la información deseada al medir el sonido en la boca del convertidor. El recuadro resaltado indica el origen de la información.

Es evidente la competencia que existe entre la facilidad de medición y la claridad de la señal esperada.

## II - 1.2 Otros métodos analizados

Además de los métodos de medición sugeridos por el personal de la acería se discutieron otras posibles soluciones:

En primera instancia se propuso utilizar un sistema emisor-receptor de ultrasonido, método usualmente empleado para conocer el nivel de líquidos en tanques. En teoría el sistema funcionaría del siguiente modo:

El emisor envía una señal de ultrasonido a través de los gases que al encontrar una interfaz entre dos medios, por ejemplo entre los gases y la emulsión, refleja parte de la onda de sonido. Conociendo la velocidad del sonido en el medio y midiendo el tiempo que tarda en llegar al receptor la onda reflejada, sería posible inferir la altura de la emulsión.

Esta técnica presenta varias dificultades a superar para el caso del convertidor:

- Los gases de escape varían su composición a medida que evoluciona el proceso y poseen partículas en suspensión, por lo que se puede dispersar el haz de sonido.
- La velocidad del sonido en los gases no permanece constante debido a las composiciones y las temperaturas cambiantes. El escape es un proceso fluidodinámico complejo, completamente turbulento, que involucra procesos químicos y de transferencia de calor y masa.
- Se debe disponer de dispositivos emisores y receptores de ultrasonido que toleren las condiciones impuestas por los gases de escape.

El segundo método propone el uso de radiación electromagnética en lugar de ondas de ultrasonido. Existen trabajos que hacen referencia a esta solución [8], pero posee una dificultad central que reside en lograr equipos que resistan las condiciones de trabajo y se mantengan limpios. Esto requiere ensayos en las condiciones de operación y hasta el momento no se ha generalizado su aplicación en plantas industriales.

Otra de las propuestas analizadas consiste en medir las vibraciones del convertidor. El método supone que es posible obtener la misma información que al medir en el extremo de la lanza, pero más depurada y directa. La dificultad central reside en desarrollar un instrumento de medición de vibraciones que no esté en contacto con la pared del convertidor. Un acelerómetro se quemaría rápidamente debido a derrames, desbordes de acero o llamaradas de gases incandescentes. Se propuso pues algún tipo de medición a distancia, por ejemplo mediante la utilización de un láser que refleje sobre alguna superficie colocada a tal efecto. No se puede descartar por completo esta solución, pero debido a que el sistema está expuesto a un ambiente extremadamente sucio, se prefirió evitar el uso de sistemas ópticos. Actualmente el laboratorio de vibraciones está trabajando en un sistema de medición semejante que utiliza la técnica de interferometría láser, y con el tiempo, quizás sea aplicable al convertidor.

Hasta aquí se han presentado varias ideas que podrían permitir el control del nivel de escoria en el convertidor. En esta situación se debió optar por alguna línea de desarrollo para seguir la tarea. Se decidió pues avanzar en el desarrollo de un sistema que tome las señales sonoras de los gases de escape debido a las

posibilidades del laboratorio, por creerse que la transferencia de información es más directa que la de cualquier otra vibración y por ser una técnica que ya demostró su eficacia.

## II - 2 Medición de la intensidad de ruido en los gases de escape.

La medición de la intensidad del ruido en los gases de escape del convertidor no es tarea sencilla ya que ellos poseen altas temperaturas (1700 °C típicamente en la boca del convertidor) y características corrosivas debido al oxígeno.

Se realizó una búsqueda de dispositivos comerciales aptos para esas condiciones y se concluyó que no existen micrófonos disponibles que soporten el ambiente hostil de los gases. El medidor utilizado por el equipo del Sonicmeter® tampoco se comercializa en forma independiente.

Lograr un dispositivo capaz de medir el nivel de ruido de esos gases es un desafío importante y se ha tomado como uno de los objetivos del proyecto. Una vez obtenida la medición del ruido de los gases, sólo se requiere analizar su intensidad para brindarle al operario una herramienta nueva de control del convertidor.

A continuación se detalla el concepto teórico de funcionamiento del dispositivo ideado. Los cálculos de diseño que avalan el correcto desempeño se presentan en el capítulo siguiente.

### II - 2.1 Características del ambiente de trabajo

Como primer paso se especificaron las propiedades del ambiente en el cual se debe registrar el nivel del ruido. La información brindada por el personal de la acería junto con la bibliografía permitieron determinar las siguientes características de los gases de escape:

Temperatura de los gases de escape: 1300 °C.

Presión de estancamiento de los gases de escape: 1 atm.

Temperatura ambiente: 50°C.

Atmósfera corrosiva, rica en oxígeno.

Estas son las condiciones de los gases en alguna posición intermedia entre la boca del convertidor y la chimenea (véase la Figura 7), donde se espera ubicar el instrumento de medición.

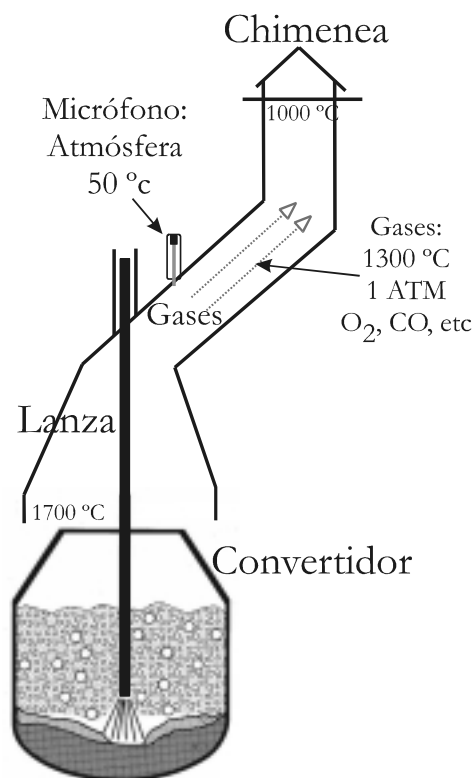


Figura 7. Esquema del conducto de escape de los gases del convertidor.

¿Cómo se construye un dispositivo para registrar el sonido en gases a 1300 °C?

El problema radica en que las ondas de presión presentes en los gases tienen que llegar a un elemento transductor o micrófono para ser convertidas en señales eléctricas. Pero bajo ninguna circunstancia los gases pueden rozar el micrófono, ya que se destruiría, independientemente del transductor comercial elegido. Luego la clave es encontrar un “alargue” o conector mecánico refrigerado que no deforme la onda, sino que la transporte intacta hasta el transductor.

#### II - 2.1.1 Filosofía de diseño.

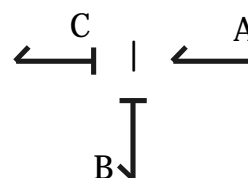
La filosofía de diseño consiste en utilizar un micrófono comercial de bajo costo acoplado a un conector mecánico que le trasmite la información del sonido. Este último es conceptualmente un análogo al eléctrico, pero que conduce ondas

mecánicas de presión en vez de electromagnéticas. El conector será refrigerado para que su temperatura disminuya desde los 1300 °C a menos de 100 °C, que es tolerable por micrófonos convencionales. Además, el conector debe poseer excelentes cualidades frente a la corrosión para evitar el excesivo mantenimiento.

Siguiendo con la analogía del conector, se deduce que los flujos de energía presentes son de tres tipos:

1. energía térmica;
2. energía elástica que corresponde a la onda de sonido;
3. energía eléctrica de la señal de control.

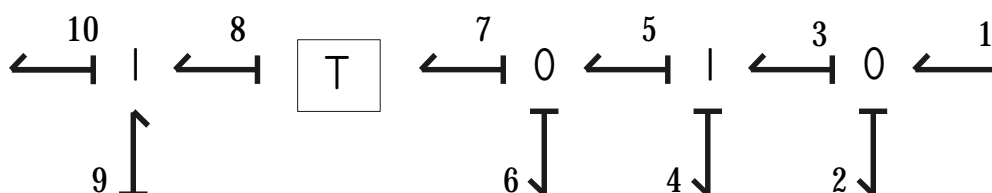
La Figura 8 es el esquema de grafos de la energía térmica. El esfuerzo está representado por la temperatura del cerámico y el flujo por la entropía generada. La potencia total disipada está representada por el producto de ambas. La situación de trabajo deseada es aquella en la que el calor transmitido por los gases (A) es igual al calor extraído (B). En este caso no hay transferencia de calor al micrófono (C), manteniendo su integridad intacta.



A: Calor transmitido por los gases  
 B: Calor extraído al refrigerar  
 C: Calor transferido al micrófono

Figura 8. Grafos de la energía térmica.

La Figura 9 representa la energía elástica de la onda de sonido y su transformación en energía eléctrica. La presión es el esfuerzo elástico, mientras que el caudal volumétrico representa el flujo. Las interfaces están caracterizadas por el vínculo tipo 0 ya que la sumatoria de presiones debe ser nula para mantener el equilibrio estático. El amortiguamiento ocurre al avanzar la onda de presión en el conector. El transformador T que, representa al micrófono, genera la señal eléctrica que será leída por el sistema electrónico de adquisición. En el caso de la energía eléctrica la tensión es el esfuerzo eléctrico, mientras que la corriente corresponde al flujo. La condición ideal de trabajo es aquella en la que las ondas reflejadas (2 y 6), el amortiguamiento (4) y el ruido eléctrico (10) son nulos.



- 1: Onda de presión de los gases.
- 2: Onda de presión reflejada en la interfaz con los gases.
- 3: Onda de presión transmitida por el conector.
- 4: Amortiguamiento de la onda de presión en el conector.
- 5: Onda de presión transmitida por el conector.
- 6: Onda de presión reflejada en la interfaz con el micrófono.
- 7: Onda de presión transmitida al micrófono.
- 8: Señal eléctrica generada por el micrófono.
- 9: Ruido eléctrico inducido.
- 10: Señal eléctrica útil para el sistema de control.

Figura 9. Grafos de la energía elástica y de la transformación a energía eléctrica.

En el próximo capítulo se detallan los cálculos que cuantifican los flujos de calor y la intensidad de la onda de presión en el transductor. Estas magnitudes permiten elegir los materiales y las dimensiones para el diseño del equipo medidor de sonido.

## Capítulo III

### Desarrollo teórico

A continuación se presentan los cálculos del comportamiento térmico y elástico necesarios para el diseño de un dispositivo de medición de sonido de gases a altas temperaturas. El diseño se orientó según las posibilidades de realizar el ensayo de validación de conceptos llevado a cabo *a posteriori*, que se detalla en el capítulo siguiente.

#### III - 1 Cálculo de transferencia de calor al medio, distribución de temperaturas y métodos de refrigeración.

Se comienza con el análisis térmico ya que es el factor crítico que impide utilizar micrófonos tradicionales. La tarea es asegurar que el conector (que transmite la onda de presión), el transductor y la electrónica no corran riesgos de quedar inutilizados debido a la elevada temperatura.

##### III - 1.1 Material del conector

El conector deberá soportar en su extremo la temperatura de diseño de los gases (1300 °C). Esto descarta a casi la totalidad de los aceros como materiales constructivos. Asimismo se requieren materiales con puntos de fusión superiores a los 2000°C, para evitar que el conector disminuya notablemente su rigidez por calentamiento. Existen muchos materiales con esa cualidad, siendo las más usuales las aleaciones de tungsteno, de tantalio, de molibdeno y los cerámicos.

En esta situación se optó por continuar el desarrollo utilizando cerámicos por las siguientes razones:

1. El elevado punto de fusión de los cerámicos, superior a los 2200 °C.
2. Su baja conductividad térmica facilita la refrigeración. Ésta es la clave para vencer el problema de la temperatura.



3. Excelente resistencia a la corrosión puesto que generalmente están formados por óxidos que son difícilmente atacados.

4. Bajo costo frente a sus competidores. El precio y la disponibilidad de los cerámicos son hoy en día sensiblemente mejores que la de los otros materiales alternativos.

Entre los cerámicos disponibles se eligió la alúmina que es un óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ). Su punto de fusión es superior a los 2300 °C, su costo comparativo es bajo, y posee excelentes propiedades térmicas.

La decisión de utilizar alúmina fue motivada por los relatos del personal del departamento de materiales que la utiliza regularmente. A modo de ejemplo se cita la experiencia cotidiana en la cual el operario puede tomar con su mano una barra de alúmina de 250 mm de largo y calentarla en el otro extremo a 1000 °C sin sufrir quemaduras. Esta experiencia muestra que la refrigeración debida a la convección natural y a la emisión de radiación es suficiente para refrigerar la barra. Para mayor información sobre cerámicos véase [9].

Antes de continuar se buscó respaldo en la bibliografía relacionada con el uso de cerámicos como conectores mecánicos. Se hallaron experimentos en otras aplicaciones en las que fueron utilizados cerámicos satisfactoriamente como intermediarios entre materiales incandescentes y transductores. Para más información véase la referencia [10].

### III - 1.2 Modelo de la transferencia de calor.

Hasta aquí se propuso utilizar un conector de alúmina, pero para dimensionarla se debe conocer el método de refrigeración. En primer término se propuso utilizar aire como refrigerante, gracias a su disponibilidad y fácil manejo. En forma equivalente se puede utilizar nitrógeno, que por ser el componente mayoritario del aire, no modifica esencialmente los cálculos, y que suele estar disponible en las plantas siderúrgicas.

Se debe aclarar que es recomendable evitar el uso de agua ya que las temperaturas son mucho mayores que su punto de ebullición y se formarían burbujas. La bibliografía muestra que estas últimas generan ruido indeseable que

es registrado por el micrófono, (véase la referencia 11). La desición final dependerá de si son aceptables los caudales necesarios para la refrigeración con aire o nitrógeno.

La Figura 10 muestra un esquema del sistema a modelar. El conector estará en contacto con los gases calientes en un extremo, mientras que el resto será refrigerado hasta llegar al micrófono. Como la atmósfera circundante se encuentra a una temperatura de 50 °C, se despreciará la transmisión del calor por radiación. Esta suposición es conservativa porque la cantidad de calor irradiada depende fuertemente de la temperatura, entre otros factores. Luego, como el ambiente se encuentra centenas de grados centígrados más frío que el cerámico, es esperable que la cantidad de calor irradiada hacia el conector cerámico sea menor que la que él irradia.

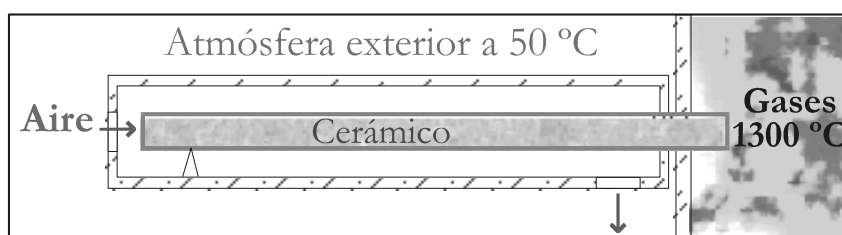


Figura 10. Esquema del conector refrigerado por aire.

Para facilitar la refrigeración del cerámico es conveniente que la longitud característica de refrigeración (su largo) sea mucho mayor que la longitud característica en contacto con los gases (como se muestra en la Figura 10). Esta suposición nos permite utilizar el modelo de conducción en aletas [12].

### III - 1.2.1 Modelo de conducción del calor en aletas.

Considérese una superficie extendida como la de la Figura 11, que representa el balance de energía en una aleta disipadora de calor. El análisis térmico se simplifica si se hacen ciertas suposiciones.

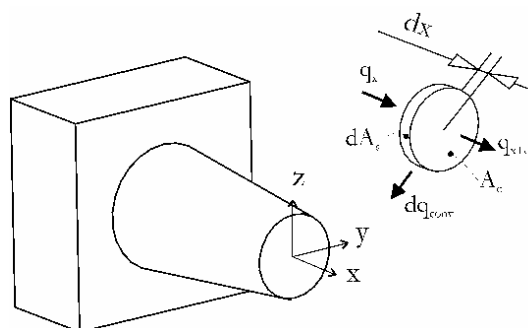


Figura 11. Balance de energía térmica entre el calor transmitido por conducción y el extraído por convección.

Aunque la conducción del calor ocurre en las tres direcciones se puede

suponer que en la aleta es unidimensional en la dirección longitudinal ( $x$ ). Esto se justifica al comparar la rapidez de la convección de energía hacia el fluido desde la superficie de la aleta, con la velocidad en la cual la energía alcanza la superficie debido a la conducción (es decir en la dirección transversal  $Y, Z$ ). En la práctica se observa que la aleta es delgada y los cambios de temperatura en la dirección longitudinal son mucho mayores que los de la dirección transversal.

Por lo tanto se supondrá que:

- la conducción es unidimensional en la dirección  $x$ ;
- la condición es de estado estable y también que la conductividad térmica es una constante;
- la radiación desde la superficie es insignificante;
- no hay generación de calor;
- el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) es uniforme sobre la superficie.

Al aplicar el requerimiento de conservación de la energía a un elemento diferencial como el de la Figura 11 se obtiene,

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv} \quad (7)$$

Donde  $q$  representa el calor transmitido por conducción en una dada posición y  $dq_{conv}$  representa el diferencial de calor extraído por convección.

De la ley de Fourier se sabe que

$$q_x = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

donde  $A_c$  es el área de la sección transversal y  $k$  la conductividad térmica del material.

La conducción de calor en la posición  $x+dx$  se expresa como,

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (9)$$

de lo cual se sigue que

$$q_{x+dx} = -kA_c \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left( A_c \frac{dT}{dx} \right) dx \quad (10)$$

La transferencia de calor por convección se expresa como,

$$dq_{conv} = h dA_s (T - T_\infty) \quad (11)$$

Donde  $dA_s$  es el área superficial del elemento diferencial y  $T_\infty$  es la temperatura de entrada del fluido refrigerante.

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación 10 que es la del balance de energía se obtiene,

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left( \frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left( \frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) \cdot (T - T_\infty) = 0 \quad (12)$$

La ecuación anterior se simplifica en los casos en que las aletas tienen una sección de superficie  $A_c$  constante. Además,  $A_s = Px$  donde  $A_s$  es el área de la superficie de la aleta medida desde la base hasta la posición  $x$  y  $P$  el perímetro de la aleta. Luego el balance de energía resulta ser,

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \left( \frac{h}{k} \frac{P}{A_c} \right) \cdot (T - T_\infty) = 0 \quad (13)$$

La solución general de esta ecuación diferencial homogénea de segundo orden es,

$$(T - T_\infty) = C_1 e^{\frac{hP}{kA_c} x} + C_2 e^{-\frac{hP}{kA_c} x} \quad (14)$$

$C_1$  y  $C_2$  son dos constantes que aún no han sido halladas.

Una vez elegido el modelo a utilizar resta determinar las condiciones de borde para definir una solución al problema y encontrar los valores de las constantes de la ecuación 14. En tal sentido recuérdese la Figura 8 donde aparece un flujo de calor hacia el micrófono que es el que se desea minimizar para evitar daños. Surge naturalmente que la condición de diseño más exigente es aquella que impide que haya un flujo de calor hacia el micrófono, es decir, que

el flujo de calor en el extremo de la aleta es cero. A ésta situación se la conoce como condición de aleta adiabática, y matemáticamente es equivalente a,

$$\frac{dT}{dx}\Big|_{(x=L)} = 0 \quad (15)$$

La solución del gradiente de temperatura en el cerámico y la transferencia de calor al medio es,

$$T(x) = (T_{gases} - T_{ambiente}) \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(m \cdot L)} + T_{ambiente} \quad (16)$$

$$q_f = M \cdot \tanh(m \cdot L) \quad (17)$$

Donde:

$T(x)$  = Temperatura del cerámico en función de la posición.

$q_f$  : Transmisión de calor de la aleta al medio

Además  $m$  y  $M$  son variables auxiliares que se definen según:

$$m^2 = \frac{h \cdot P}{k \cdot A} \quad (18)$$

$$M = (T_{gases} - T_{ambiente}) \sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A} \quad (19)$$

Donde:

$T_{gases}$  = Temperatura de los gases.

$T_{ambiente}$  = Temperatura ambiente

$L$  = Largo del cerámico.

$P$  = Perímetro.

$A$  = Área de contacto del cerámico con los gases.

$h$  = Coeficiente de convección de refrigeración.

$k$  = Coeficiente de conducción del calor del cerámico.

III - 1.2.2 ¿Es razonable utilizar el criterio de conducción unidimensional?

Para desarrollar un criterio adecuado para evaluar la suposición de unidireccionalidad considérese la conducción en estado estable a través de una pared plana de área  $A$  como en la Figura 12. Una superficie se mantiene a una temperatura  $T_1$  y la otra se expone a un fluido de temperatura  $T_\infty < T_1$ . La temperatura de esta última superficie será algún valor intermedio  $T_2$ . En condiciones de estado estable, el balance de energía se la superficie será,

$$\frac{kA}{L}(T_1 - T_2) = hA(T_2 - T_\infty)$$

Reordenando se obtiene,

$$\frac{(T_1 - T_2)}{(T_2 - T_\infty)} = \frac{hL}{k} = Bi \tag{21}$$

La cantidad  $\frac{hL}{k}$  es un parámetro adimensional. Se denomina número de Biot y desempeña un papel fundamental en problemas de conducción que involucran efectos de convección superficial. Si  $Bi \ll 1$ , la resistencia a la conducción dentro del sólido es mucho menor que la resistencia a la convección a través de la capa límite del fluido. En consecuencia es razonable la suposición de una distribución de temperaturas uniforme en la sección de la aleta. La experiencia muestra que para una aproximación ingenieril es suficiente si  $Bi < 0.1$ . En el caso de la aleta de sección circular se suele utilizar como criterio prudente una longitud  $L$  igual al radio de la sección (véase la referencia 12).

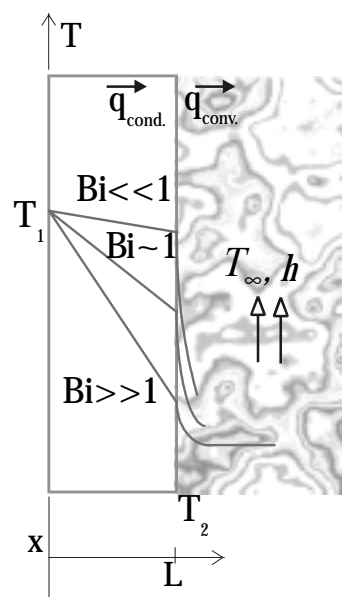


Figura 12. Esquema de transferencia de calor.

III - 1.2.3 Aplicación del modelo de la aleta

El modelo supone que el número de Biot del radio es mucho menor a 0.1. Esta limitación del modelo debe ser corroborada con las dimensiones finales, o rectificadas en su defecto.

En principio todos los parámetros de las ecuaciones 16 a 19 no están determinados a excepción del coeficiente de conducción de la alúmina y de las temperaturas de los gases y del ambiente. En consecuencia se propuso utilizar un cerámico de 5 mm de diámetro por ser un tamaño típico de los elementos sensibles de los micrófonos comerciales (por ejemplo, los de tipo piezoeléctricos o capacitivos). Además se eligió una longitud de 150 mm y un coeficiente de convección de 25 W/m<sup>2</sup> K. Se debe recordar luego de verificar los requerimientos necesarios para lograr obtener el coeficiente de convección propuesto.

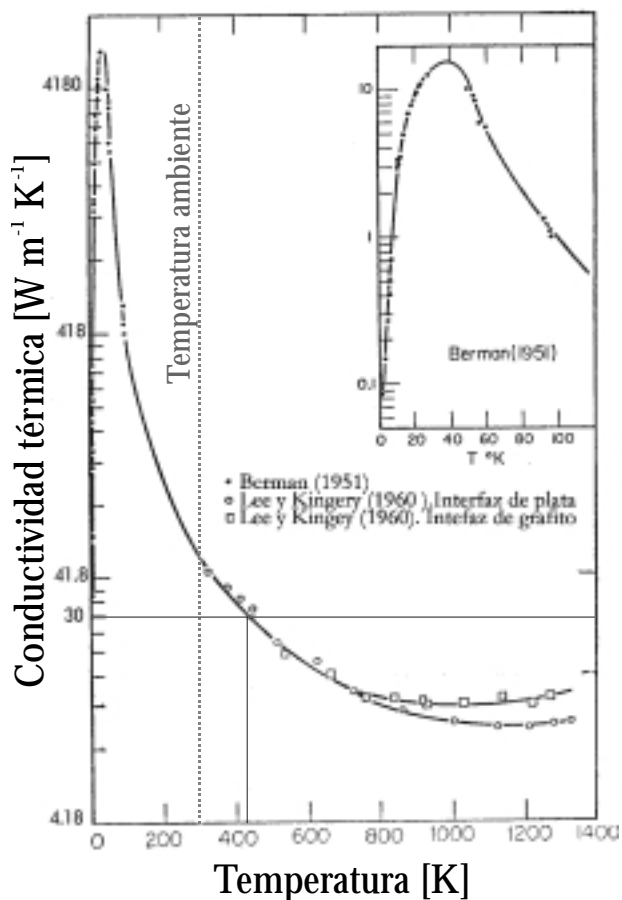


Figura 13. Variación de la conductividad térmica de la alúmina con la temperatura. Ref. [9]

La conductividad térmica de la alúmina varía con la temperatura según se muestra en la Figura 13, (véase la referencia 9). El modelo supone una conductividad constante, por lo que al utilizar un valor de 30 W/m K, la aproximación será conservativa para las zonas del cerámico cuya temperatura sea mayor de 150 °C.

De resolver la ecuación 16 se obtiene la distribución de temperaturas a lo largo del cerámico que se presenta en Figura 14:

Nótese que cerca de dos tercios del cerámico se calcularon con un valor conservativo de la conductividad térmica.

En la Figura 14 se observa claramente que utilizando un cerámico de 150 mm se cumple que el extremo donde se acoplará el micrófono permanezca a una temperatura menor a 100 °C.

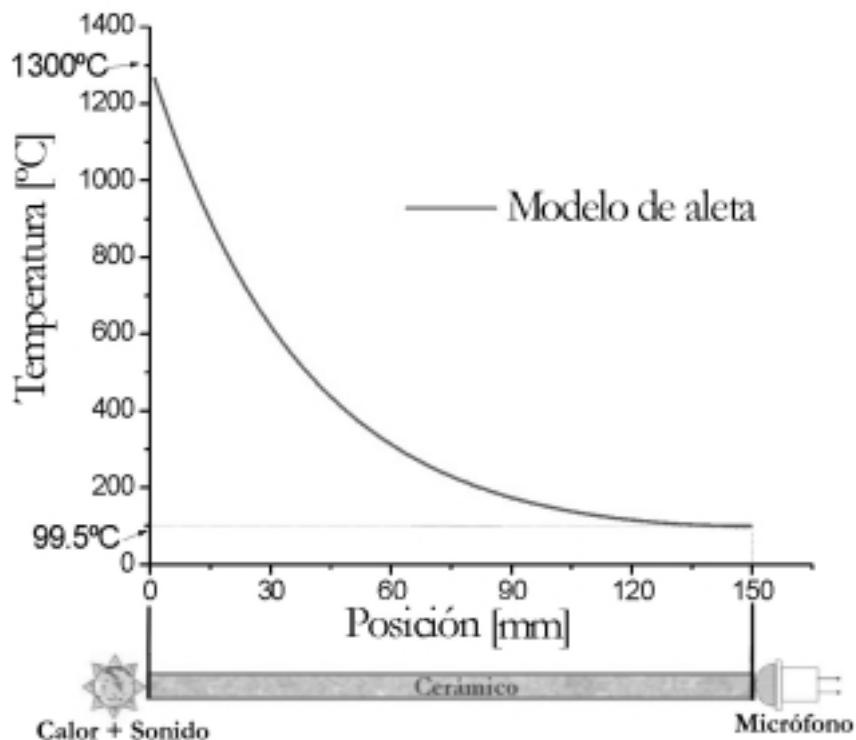


Figura 14. Distribución de la temperatura a lo largo del conector cerámico.

Al calcular el número de Biot se obtuvo que  $Bi = 0.0021 < 0.1$ , por lo que el uso del modelo de conducción de calor unidireccional está justificado.

A continuación se calculan que requerimientos son necesarios para lograr un coeficiente de convección de 25 W/m<sup>2</sup> K. Para ello se analizó el caso del cerámico ubicado dentro de un conducto, con aire circulando a su alrededor, como lo muestra la Figura 10. Se suponen condiciones de flujo turbulento, lo cual lleva a considerar correlaciones empíricas.

Una de las correlaciones más utilizadas es la de Dittus-Boelter (véase la referencia 12) que predice que el número de Nusselt será:

$$Nu_{D_h} = 0.023 \cdot Re_{D_h}^{4/5} Pr^n \tag{22}$$

Donde:

$Nu_{D_h}$  = Número de Nusselt basado en el diámetro hidráulico.



$Re_{D_h}$  = Número de Reynolds basado en el diámetro hidráulico.

$Pr$  = Número de Prandlt.

$n = 0.4$ , ya que se trata de un caso de calentamiento del fluido.

De la definición del número de Nusselt se obtiene que:

$$Nu_{D_h} = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad (23)$$

La correlación anterior supone tubos lisos, pero esto no es inconveniente ya que el coeficiente de transferencia de calor aumenta con la rugosidad de la pared, mejorando así la refrigeración. El modelo propuesto resulta pues una aproximación conservativa.

En las secciones anulares existen dos coeficientes de convección asociados a cada superficie. La referencia 12 justifica como una estimación razonable, como primera aproximación, suponer iguales los coeficientes de convección en la pared del conducto y en el cerámico.

De la definición del número de Reynolds se obtiene que,

$$Re_{D_h} = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad (24)$$

Donde:

$V$  = Velocidad del aire dentro del conducto.

$\nu$  = Viscosidad cinemática

Y el diámetro hidráulico se calcula utilizando la siguiente ecuación,

$$D_h = D_{\text{conducto}} - D_{\text{cerámico}} \quad (25)$$

Donde:

$D_{\text{conducto}}$  = Diámetro interno del conducto.

$D_{\text{cerámico}}$  = Diámetro del cerámico.

Combinando las ecuaciones 22 a 25 se obtiene,

$$V = \left( \frac{h}{0.023 \cdot k \cdot \text{Pr}^n} \right)^{5/4} \cdot v \cdot (D_{\text{conducto}} - D_{\text{cerámico}})^{1/4} \quad (26)$$

Para hallar la velocidad se necesitan suponer los valores de las propiedades físicas del aire. Estas suposiciones se corroborarán posteriormente calculando la temperatura de salida del aire.

Supóngase pues que el aire sale del conducto a 75 °C, luego su conductividad térmica es de 0.03 W/m K y la viscosidad cinemática es 0.0000209 m<sup>2</sup>/s. Suponiendo además un diámetro interior del conducto de 30 mm se obtiene de la ecuación 26 que la velocidad del aire debe ser de 4.97 m/s.

Al utilizar la ecuación 17 se halla que el calor que extraer el aire del cerámico es de 18.75 W.

Luego, el cambio de temperatura se obtendrá de resolver.

$$\Delta T_{\text{aire}} = \frac{4 \cdot q_f}{\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \pi \cdot D_h^2} \quad (27)$$

De aquí se obtiene que el aire eleva su temperatura en solo 5.49 °C, con lo que la estimación de los parámetros es aceptable y el cálculo precedente es correcto.

Por último se procede a dimensionar el ventilador necesario para la refrigeración por lo que es necesario calcular el caudal de aire que debe impulsar.

El caudal (Q) se obtiene de

$$Q = V \cdot \pi \cdot \left( D_{\text{conducto}}^2 - D_{\text{cerámico}}^2 \right) \quad (28)$$

De donde resulta que son necesarios 0.00342 m<sup>3</sup>/seg. Nótese que este caudal es fácilmente alcanzable con un ventilador de refrigeración microprocesador, que es el que será utilizado en el ensayo experimental.

Cabe recordar que es muy utilizada en la industria siderúrgica la circulación de nitrógeno, gas que es el componente mayoritario del aire, por lo que los cálculos anteriores sufrirían solo ligeras correcciones si se lo utilizara.

### III - 1.2.4 Estimación del tiempo de establecimiento del estado estacionario

Antes de finalizar los cálculos de transferencia de calor es deseable conocer el tiempo que demora el sistema en llegar a una condición estacionaria y así estimar el tiempo necesario durante el cual llevar a cabo cualquier ensayo térmico.

Se puede suponer que la condición estacionaria se alcanza cuando el número adimensional de Fourier vale 3.

El número de Fourier se define como

$$F_o = \frac{\alpha \cdot t}{L^2} \quad (29)$$

Donde:

$\alpha$  = Conductividad térmica de la alúmina.

t = Tiempo asociado al número de Fourier.

El tiempo que hace que  $F_o = 3$  estima cuánto se debe esperar para considerar que las temperaturas del cerámico se asemejan a las del estado estacionario, con un error del 5% de la variación en la temperatura.

$$t = \frac{F_o \cdot L^2}{\alpha} = \frac{F_o \cdot L^2 \cdot \rho \cdot c}{K} = \frac{3 \cdot 0.15^2 \cdot 3900 \cdot 765}{30} = 6713s = 112min \quad (30)$$

Donde

$$c = 765 \frac{J}{kg \cdot K} \text{ Calor específico de la alúmina (véase la referencia 9)}$$

Se espera que luego de 112 minutos el sistema alcance el estado estacionario con un error ingenieril aceptable.

III - 2 Cálculo de la intensidad del sonido transmitida al micrófono, amortiguamiento y optimización del método de medición.

La señal recibida por el micrófono depende de la eficiencia con la que el cerámico transmite los sonidos. Para evaluar esta característica y estimar las pérdidas 2, 4 y 6 de la Figura 9 se utilizó en primer lugar el modelo unidimensional de la referencia 13.

III - 2.1 Modelo unidimensional

Supóngase que existen dos medios diferentes separados por una interfaz plana, según se observa en la Figura 15.

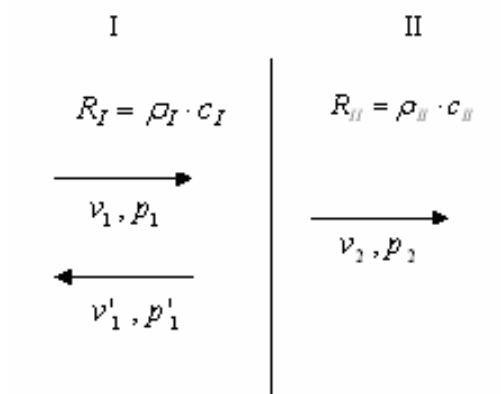


Figura 15. Esquema de la interfaz entre dos medios de transmisión del sonido diferentes.

El amortiguamiento de la onda de sonido dependerá del medio donde se desplaza. El modelo más sencillo posible realiza una analogía con los circuitos eléctricos y define la resistencia acústica de un medio en función de su densidad y de la velocidad del sonido según:

$$R_i = \rho_i \cdot c_i \tag{31}$$

$R_i$  : Resistencia acústica del medio  $i$

$\rho_i$  : Densidad del medio  $i$

$c_i$  : Velocidad del sonido en el medio  $i$

Al incidir una onda de sonido plana en forma normal sobre la interfaz, parte de esa onda será transmitida al segundo medio y parte será reflejada.

Nótese que éste es un modelo simplificado y no incluye las posibles variaciones con la frecuencia de la onda incidente. Este efecto aparece generalmente para altas frecuencias donde la estructura interna del material tiene tamaños semejantes a las longitudes de onda involucradas. Como este no es el caso, se asumirá que no existe tal dependencia.

En la Figura 15 se representa con  $v_1$  a la amplitud de velocidad y  $p_1$  es la amplitud de presión de la onda incidente. Además  $v_1'$  es la amplitud de velocidad y  $p_1'$  es la amplitud de presión de la onda reflejada. Para el segundo medio se denomina a  $v_2$  como la amplitud de velocidad y  $p_2$  como la amplitud de presión de la onda transmitida.

En la interfaz la velocidad y la presión cambian a lo largo del tiempo pero no pueden aparecer discontinuidades entre los medios. Esto proviene de suponer que en los medios no hay discontinuidades y que cualquier desbalance de presiones entre dos superficies infinitamente cercanas se compensa instantáneamente.

La eficiencia en la transmisión de la energía de sonido desde el primer medio al segundo se puede evaluar utilizando el coeficiente de transferencia de energía ( $\tau$ ) definido como:

$$\tau = \frac{4 \cdot R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} \quad (32)$$

Este coeficiente está definido como la relación entre la intensidad de la onda transmitida y la intensidad de la onda incidente.

También se definen los coeficientes de transmisión de presión ( $\tau_p$ )

$$\tau_p = \frac{2 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (33)$$

y de transmisión de velocidad ( $\tau_v$ )

$$\tau_v = \frac{2 \cdot R_1}{(R_1 + R_2)} \quad (34)$$

Si  $R_2 > R_1$  el segundo medio es acústicamente más rígido que el primero, por lo que aparece un cambio de fase en la velocidad reflejada mientras que la presión reflejada se mantiene en fase.

También debe notarse que a pesar de que el coeficiente de transmisión de energía  $\tau$  sea muy pequeño, por ejemplo en la transición donde un medio es mucho más rígido que otro, la presión acústica prácticamente se duplicará.

### III - 2.1.1 ¿Cómo se entiende que en la transición a un medio más rígido la onda de presión duplique su intensidad?

Para explicar el proceso físico involucrado supónganse dos bolas de billar, una mucho más densa y grande que otra. Si se hace chocar la bola más pequeña con la mayor, ésta rebotará invirtiendo la dirección de su movimiento mientras que la bola mayor, apenas se moverá. Al analizar las cantidades de movimiento involucradas se encontrará que el cambio en el momento cinético de la bola menor es el doble de la cantidad que inicialmente poseía. Además, debido a la conservación del momento, la bola mayor también habrá incrementado su momento cinético en la misma proporción, pero sentido inverso. Como conclusión se obtiene que el cambio de momento en la bola mayor duplica en módulo al que poseía inicialmente la bola menor. El mismo efecto ocurre con la onda de sonido al incidir en un medio más rígido, ya que se duplica el momento del cerámico, que se manifiesta en la presión transmitida al micrófono que se encarga de detenerlo.

### III - 2.1.2 ¿Qué ocurre en el caso del conector de alúmina?

Para conocer los coeficientes de transferencia se debe estimar los valores de las densidades y de la velocidad del sonido en cada medio.

En el caso de la alúmina la densidad se puede aproximar en  $3900 \text{ kg/m}^3$ . Este valor se mantiene constante si se desprecia la dilatación térmica.

La velocidad del sonido en la alúmina varía levemente con la temperatura según se muestra en la Figura 16 (véase la referencia 14). Pese a que el rango de temperatura al que estará sometida la alúmina es algo mayor al de la figura citada, se puede estimar en forma conservativa que la velocidad del sonido es de  $10000 \text{ m/seg}$ .

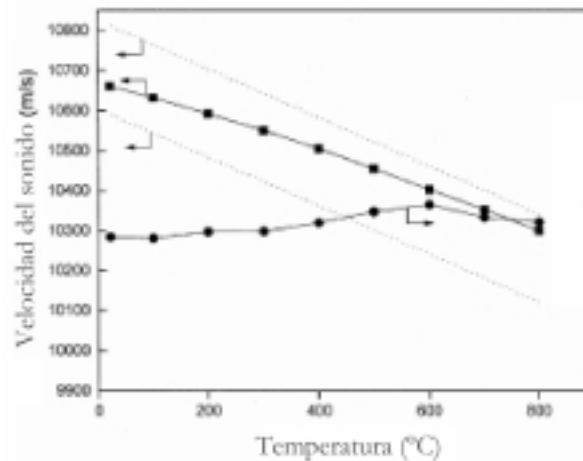


Figura 16. Estimación de la velocidad del sonido en la alúmina en función de la temperatura. Ref. [14]

Las propiedades de los gases utilizadas serán las del aire a 1300 °C. A estas temperaturas, su densidad es de 0.22kg/m<sup>3</sup> y la velocidad del sonido se la puede calcular según la ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p_0}{\rho_0}} \tag{35}$$

Donde:

$\gamma$ : Constante adiabática de los gases.

$p_0$ : Presión de estancamiento del aire.

$\rho_0$ : Densidad del aire.

La constante adiabática de los gases es 1.4 y no varía notoriamente entre los 50 °C y 1300 °C, (Véase la referencia 15). La presión esta definida por las condiciones del problema (1 Atm). De la ecuación 35 resulta que el valor de la velocidad del sonido en aire a 1300 °C de 785.5 m/seg.

Luego, los coeficientes de transmisión serán:

$$\tau = 1.77 \times 10^{-5}$$

$$\tau_p = 2$$

$$\tau_v = 8.86 \times 10^{-6}$$

Nótese que el error introducido al reemplazar las propiedades del aire por las de los gases no puede modificar los órdenes de magnitud de los coeficientes.

Es decir que la energía que llega al micrófono disminuye cinco órdenes de magnitud debido a la gran diferencia de rigidez entre los dos medios. He aquí un dato importante que se debe remarcar. Si se quisiera medir la velocidad del cerámico se encontraría una señal muy atenuada. En cambio, la onda de presión no se atenúa sino que por el contrario, se incrementa.

Se concluye luego que será necesario medir la presión y no la velocidad del cerámico. La sensibilidad que debe poseer el detector de presión es equivalente a la de cualquier micrófono comercial. Típicamente los sonidos audibles por el humano poseen presiones entre 2 E-10 a 1 E-3 bares.

### III - 2.2 Modelo Bidimensional

Se analizó el caso en que la onda no incide en forma normal a la interfaz. Nótese que si se desprecian los efectos viscosos del aire se puede suponer que la onda de sonido es perfectamente longitudinal y que no hay interacción entre las moléculas transversales a la dirección de la onda. Bajo esta suposición se deduce que la situación física más compleja está bien representada por el modelo aquí propuesto.

Supóngase el caso de la onda de sonido incidiendo en forma oblicua con un ángulo  $\theta_1$ , según muestra la figura.

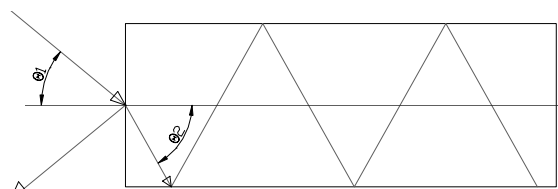


Figura 17. Esquema de una onda de sonido incidiendo en forma oblicua.

De la ley de Snell

$$\frac{C_1}{\text{Sen}\theta_1} = \frac{C_2}{\text{Sen}\theta_2} \tag{36}$$

Luego, la onda de presión se transmitirá con un ángulo  $\theta_2$

Según la bibliografía, las ondas de sonido que son de utilidad al proceso de control del convertidor son de baja frecuencia y poseen una longitud de onda que se puede hallar de la ecuación,

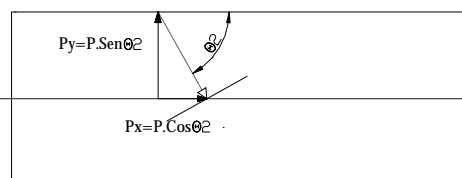


Figura 18. Esquema de la descomposición de una onda de sonido.

$$c_i = \lambda \cdot f \tag{37}$$



Donde:

$c$ : Velocidad de sonido en el aire.

$\lambda$ : Longitud de onda.

$f$ : Frecuencia.

Si se utiliza la velocidad del sonido del aire a 1300 °C, y se supone una frecuencia conservativa de 1000 Hz (véase la referencia 16), se obtiene que la longitud de onda es 785 mm. También se debe calcular este parámetro en el cerámico que resulta ser de 10000 mm. Al comparar las longitudes de onda con el diámetro se verifica que las dimensiones del cerámico son mucho menores, por lo que es correcto analizar la reacción del cerámico como si estuviese sometido a cambios de presiones homogéneos.

Al descomponer esta onda de presión en direcciones normales se obtienen dos ondas. La onda en la dirección transversal al cerámico podría ser transmitida al micrófono como tensiones de flexión, pero esto difícilmente sea detectable ya que el diámetro del cerámico es mucho menos que la longitud de onda y la tensión neta generada es muy pequeña. Sólo es útil la componente en la dirección axial que es la que llegará al micrófono. Esta cualidad le confiere carácter unidimensional al micrófono.

Resulta interesante notar que el análisis anterior cambia completamente si las frecuencias de interés fuesen mucho mayores. En el caso del ultrasonido, las longitudes de onda son comparables o menores a las dimensiones del cerámico, por lo que se debe considerar el carácter ondulatorio del sonido. Es decir, no es válido modelar los efectos del sonido como cambios de presión homogéneos. En este caso, y debido a la rigidez del cerámico, aparece el efecto de reflexión total de las ondas de presión, y la transmisión del sonido tiene un mecanismo totalmente diferente ya que ocurre a través de ondas evanescentes.

### III - 2.3 Estimación de la frecuencia máxima de trabajo.

Uno de los inconvenientes que puede presentar el dispositivo es tener un ancho de banda de trabajo menor al necesario. Es decir, que al excitarlo con frecuencias de 1000 Hz, la respuesta dinámica no sea la deseada y la inercia propia de los elementos promedie la señal. Para evaluar esto es necesario

conocer el micrófono a utilizar. Para los fines prácticos de estimar la reacción y avanzar o descartar el prototipo se propone considerar un micrófono piezoeléctrico. En particular se supondrá que se trata de un piezoeléctrico común del tipo KDP.

El ancho de banda del sistema depende del tiempo que tarde el cerámico en transmitirle la presión al micrófono. Al llegar la onda de presión, se somete al cerámico a un esfuerzo axial. Este esfuerzo equivale a una aceleración según la ley de Newton. Luego el tiempo que tarda en recorrer una distancia  $d$  suponiendo un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado será:

$$t = \sqrt{\frac{d}{a}} = \sqrt{\frac{d}{\frac{F}{M}}} = \sqrt{\frac{d \cdot M}{P \cdot \frac{D_{\text{cerámico}}^2}{4}}} = \sqrt{\frac{d \cdot \rho \cdot L}{P}} \quad (38)$$

Donde

$a$ : Aceleración.

$d$ : Desplazamiento del centro de masa del cerámico.

$F$ : Fuerza ocasionada por la onda de presión.

$M$ : Masa del cerámico.

$P$ : Presión.

$\rho$ : Densidad del cerámico.

$L$ : Largo del cerámico.

Aún resta estimar la distancia  $d$  que debe recorrer el centro de masa del cerámico hasta que aparezca el esfuerzo de reacción del micrófono. Ésta distancia depende de dos factores:

1. la deformación del piezoeléctrico;
2. la deformación del cerámico.

El piezoeléctrico supuesto es un cerámico y su módulo de Young es del mismo orden que el de la alúmina según la referencia 17. Esta semejanza en sus propiedades permitió simplificar los cálculos suponiendo un cerámico con una longitud equivalente de 155 mm y con ello incluir los efectos de la deformación del transductor.

El módulo de Young de la alúmina es aproximadamente 70 Gpa [17]. Luego la deformación total del cerámico más la del piezoeléctrico será de:

$$d_{Total} = \frac{L_m \cdot P}{E} = 2 \cdot d \quad (39)$$

Donde

$L_m$  : Largo modificado del cerámico.

$E$ : Módulo de Young

Nótese que la deformación total del conjunto corresponde al doble del desplazamiento que sufre su centro de masa.

Al reemplazar la ecuación 39 en la 38 se obtiene

$$t = \sqrt{\frac{\rho \cdot L_m^2}{2 \cdot E}} \quad (40)$$

Resulta interesante notar en esta última ecuación que el tiempo asociado a la reacción del cerámico depende solo de su largo y de propiedades del material.

Utilizando la ecuación 40 para el cerámico de 155 mm de largo se obtiene que el tiempo que tarda en desplazarse el centro de masa es de  $2.59 \times 10^{-5}$ . Este tiempo se asocia con la máxima frecuencia de trabajo que será:

$$f = \frac{1}{t} = 38.6 \text{kHz} \quad (41)$$

Se concluye que el ancho de banda disponible para lograr una transmisión efectiva del cerámico es dos órdenes de magnitud mayor al necesario según la bibliografía. El cálculo anterior supone utilizar un micrófono piezoeléctrico por lo que, de no funcionar otro tipo de traductor, siempre se podrá utilizar esta primer opción.

Si se deseara aumentar el ancho de banda para otras aplicaciones (como por ejemplo las de ultrasonido) se requiere disminuir la longitud del cerámico o hacerlo más liviano. Una táctica que puede aumentar en un factor uno y medio el ancho de banda es utilizar alúmina porosa, cuya densidad puede fácilmente caer por debajo de  $2000 \text{ kg/m}^3$ .

### III - 2.4 Principio de funcionamiento

En este capítulo se ha analizado la viabilidad teórica de un diseño y distintos aspectos de los principios físicos que dominan el comportamiento del dispositivo de medición de sonido. Tomándolos en conjunto se infiere que el funcionamiento será el siguiente:

El sistema consta de dos elementos. El primero es un cerámico de 150 mm de largo y 5 mm de diámetro cuyo extremo está en contacto con gases a 1300 °C, y donde inciden ondas de sonido. La refrigeración con aire (o nitrógeno) permite que la temperatura disminuya a menos de 100 °C en el extremo opuesto. Las ondas de sonido presentes en los gases someten al extremo del cerámico a una variación de presión. La presión transmitida es del doble de la de los gases debido a la rigidez del cerámico, facilitando su detección con un micrófono convencional.

El segundo de los elementos lo constituye el micrófono comercial que opera a 100 °C. El micrófono, que hace las veces de apoyo del cerámico, traduce la señal de presión en señales eléctricas. El tipo de micrófono debe permitir registrar los cambios de presión y no la velocidad del cerámico.

El capítulo que continúa detalla los ensayos de laboratorio llevados a cabo para comprobar los conceptos teóricos.

## Capítulo IV

### Implementación del diseño y ensayos.

Una vez comprobado el funcionamiento teórico del diseño, se realizó un ensayo para validar los conceptos. Para ello se diseñó el montaje y una forma de implementación apropiada para una prueba de laboratorio.

La Figura 19 muestra un esquema del diseño del prototipo para validar los conceptos. La confección se realizó en el laboratorio de ingeniería a manos del autor.

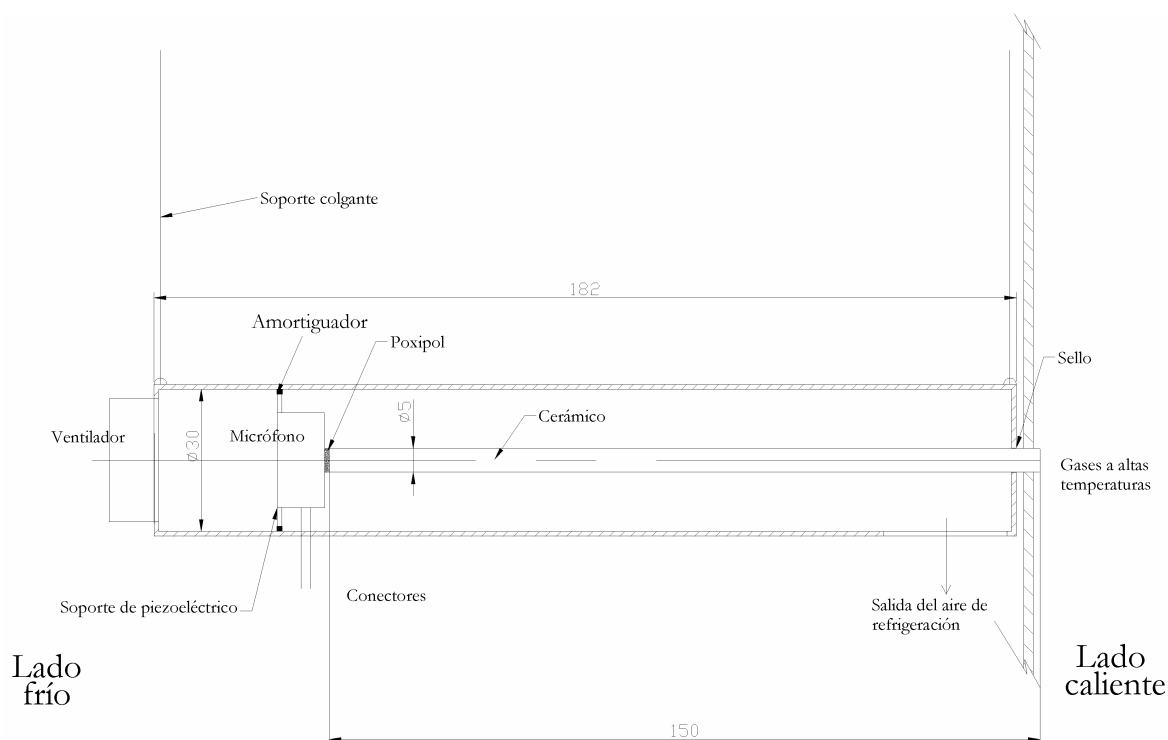


Figura 19. Plano constructivo del instrumento ensayado.

#### IV - 1 Características técnicas del prototipo.

- El cerámico: Es una barra de alúmina sujeta en un extremo por un sello mecánico y en el otro por el micrófono. El micrófono se adhirió al cerámico

con cianocrilatos. Se realizaron pruebas con otros pegamentos plásticos que no resultaron eficaces ya que provocaron el amortiguamiento casi total de la onda de presión. Igualmente se podría haber utilizado “Poxipol” que posee una densidad semejante a la de la alúmina y no interferiría la onda (ver ecuación 33), pero se evitó su uso para reutilizar el micrófono en sucesivas pruebas.

- El Ventilador: Se propuso emplear un ventilador comúnmente utilizado para la refrigeración de los microprocesadores de computadora. La entrada del aire frío se realiza por el extremo donde se encuentra el micrófono para asegurar la refrigeración y evitar la contaminación con gases que pudiesen atravesar el sello. El ruido generado ronda los 30dB según el fabricante, con un patrón de frecuencia característico, por lo que el filtrado de la señal es sencillo. En la aplicación industrial el ventilador se reemplazará por la alimentación de nitrógeno usualmente disponible en las instalaciones.

- El sello mecánico: En el ensayo los gases calientes no son peligrosos, por lo que no fue necesario implementar un sello riguroso entre el cerámico y el conducto que dirige el aire de refrigeración. En principio se propuso que la misma tapa del conducto funcionara de sello, aprovechando la dilatación del material. El diámetro del orificio en la tapa del conducto se estimó en 5.5 mm.

Si el micrófono se utilizara en una aplicación donde no pueden existir fugas de los gases calientes a través de los gases de refrigeración, se debería rediseñar el sello para el caso específico. Existen sellos cerámicos de alta tecnología que podrían resultar muy útiles.

Es de notar que una unión rígida entre el sello y el cerámico absorbería parte de la onda de presión dirigida al micrófono.

- El transductor: El montaje del micrófono no debe obstruir de manera considerable el flujo de aire. En el dispositivo de laboratorio no se lo colocó rígidamente, sino que se lo apoyó libremente. Solidario al transductor se ubica una termocupla tipo K que permite conocer si existe algún riesgo térmico para el micrófono.

- El soporte colgante: Para evitar vibraciones a través de apoyos se propuso colgar el sistema a través de dos cuerdas. Para aplicaciones industriales

la longitud de las cuerdas puede ser adaptada para resonar en las frecuencias transmitidas por la estructura y mitigar así su influencia en la señal.

#### IV - 2 Descripción de la implementación del sistema

- El cerámico y su alojamiento

El conducto que aloja al cerámico y dirige el fluido refrigerante se fabricó con un caño de acero estructural de 30 mm de diámetro y 200 mm de largo aproximadamente. En uno de sus extremos se ubicó un ventilador comúnmente utilizado para refrigerar microprocesadores (tipo pentium). El aire impulsado por el ventilador deja el conducto metálico a través de 8 orificios



Figura 20. Caño metálico para alojar el cerámico. Nótese los agujeros de salida del aire refrigerante.

de 2 mm de diámetro realizados a lo largo del perímetro del caño en el extremo donde asoma el cerámico. En éste mismo extremo se colocó una tapa con un orificio para el cerámico. El ajuste no fue preciso y permitió deslizar el cerámico sin huelgo.

El cerámico utilizado en la experiencia es de alúmina de 5 mm de diámetro y 150 mm de largo. Éste es comúnmente utilizado para proteger termocuplas por lo posee en su interior 4 agujeros longitudinales no deseados de 1 mm de diámetro aproximadamente. Se utilizó esa barra de alúmina pese a la presencia de los orificios ya que fue el elemento disponible más cercano al diseño propuesto. No es esperable que su presencia influya notoriamente en los resultados debido a su reducido tamaño.

Fue necesario aislar el caño del ruido acústico presente en el medio. Para ello se colocó el caño dentro de una protección de telgopor comercial con una cobertura de lana de vidrio. También se agregó dentro del caño una capa de lana de vidrio alrededor del cerámico, que era refrigerada también por el aire en circulación.

- El micrófono y su electrónica

Los cables del micrófono son comunes ya que no son sometidos a temperatura y asoman al exterior a través de un orificio en el extremo del caño. Por el mismo orificio se extrajo el alambre de la termocupla hacia el lector.

El micrófono utilizado es del tipo capacitivo, denominado comercialmente “Electret” y de muy bajo costo. Este tipo de micrófono registra la señal de sonido gracias al cambio de la capacidad eléctrica que ocurre al desplazarse una de las placas de un condensador cuando incide una onda de sonido.



Figura 21. Micrófono utilizado. Nótese la malla de blindaje.

El ruido eléctrico inducido en el micrófono fue uno de los problemas hallados. Para eliminarlo se blindó el micrófono con una malla conectada a tierra desde su cápsula hasta la conexión con el circuito. Además, sobre la superficie de la cápsula del “Electret” y soldada a la malla se ubicó una termocupla tipo K. Con ella, y gracias a un lector calibrado con agua hirviendo se realizaron mediciones de la temperatura del micrófono.

La señal del micrófono sin amplificación es de baja calidad por lo que resulto necesario implementar una electrónica de acondicionamiento. El circuito utilizado se muestra en la Figura 22.

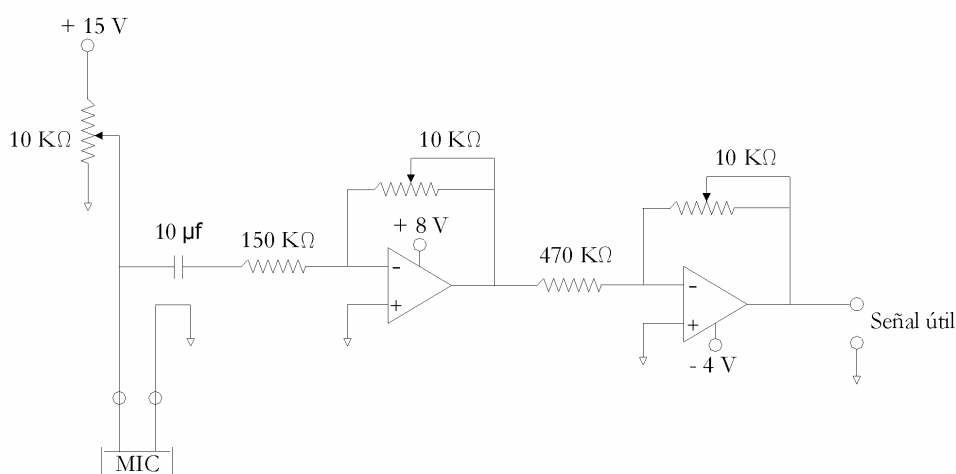


Figura 22. Esquema del circuito electrónico utilizado para acondicionar la señal del micrófono.



La alimentación (15 V) se realizó mediante una batería para disminuir el ruido que aparece al conectarlo a la red eléctrica. La señal útil se visualizó en un osciloscopio.

- La fuente de calor

Debajo de la punta expuesta del cerámico se ubicó un mechero de gas natural. El mechero se ajustó a un sostén para impedir su desplazamiento y regular la posición de la llama. La entrada de aire del mechero se reguló hasta conseguir la máxima temperatura posible, que resultó ser de 900 °C. Esa temperatura se alcanza en los bordes de la llama y es allí donde se ubicó la punta del cerámico.

- El montaje

El dispositivo se montó utilizando una base metálica de la cual se colgó el caño. Se aisló con cartón y se utilizaron cuerdas de algodón para minimizar las vibraciones transferidas desde la mesa.

Sobre la misma base donde se ubicó el mechero se colocó un parlante de computadora. Éste se alimentó con una señal eléctrica senoidal proveniente de un generador de onda digital, que permitió variar la frecuencia e intensidad del sonido.

Por último la señal proveniente del circuito amplificador se visualizó en un osciloscopio digital que permite guardar la información en archivos de datos.

### IV - 3 El ensayo

El primer paso consistió en calibrar el micrófono antes de adosarle el cerámico. Se realizó un análisis de la respuesta en frecuencia y se verificó que la intensidad del sonido emitida por el parlante depende fuertemente de la frecuencia. Ésta variación se verificó tanto con la señal del micrófono como simplemente escuchándola. También se verificó que, para frecuencias mayores a 5000 Hz, el parlante no responde satisfactoriamente. Estos inconvenientes fueron salvados adecuadamente para experimentar con el dispositivo en las condiciones de diseño.

Se eligió pues una solución de compromiso en la cual se fijó la frecuencia a estudiar en 500 Hz. Esta frecuencia no es arbitraria, sino que se basa en la experiencia de otros sistemas antes mencionados (por ejemplo el Sonicmeter®). La señal eléctrica que alimentó al parlante fue una onda senoidal de 500 Hz y 10 V pico a pico. El parlante se ubico a 100 mm del micrófono. La Figura 23 muestra la señal captada por el micrófono y registrada a través del osciloscopio. Nótese que la onda no está deformada, por lo que la función de transferencia del micrófono es una constante.

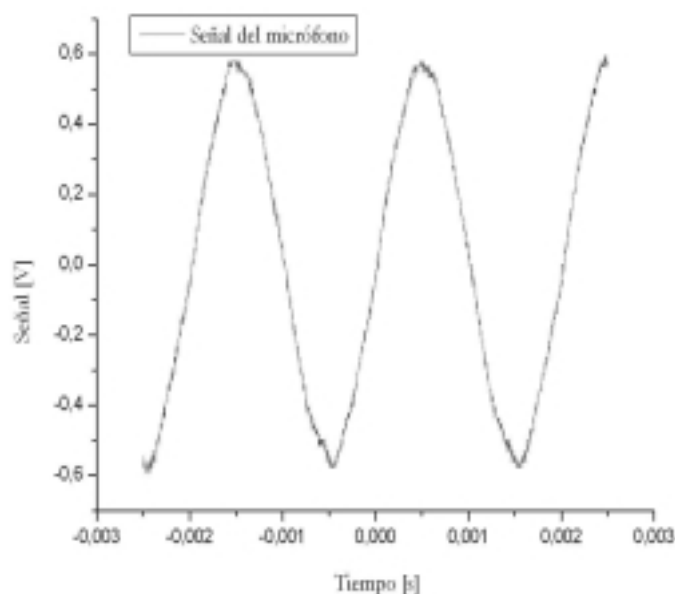


Figura 23. Señal de calibración captada por el micrófono.

A continuación se adhirió el micrófono al cerámico y se montó el resto del sistema. Se realizó una prueba análoga a la anterior pero ubicando la punta del cerámico a 100 mm del parlante. El parlante se alimentó con la misma señal senoidal que antes. La señal resultante fue aun mejor que si no estuviese el cerámico, llegando en algún caso a saturar el micrófono. La rigidez de la unión entre la cápsula del micrófono y el cerámico mejora la transmisión de la onda de presión hacia el transductor interno. Esto se podría justificar teóricamente con la ecuación 33.

Éste aparente buen indicio de la mejor transferencia de la onda de presión ocasionó que se deba disminuir la tensión de alimentación del parlante, perdiendo así la posibilidad de comparar con el micrófono por separado. Luego se reguló la

tensión de alimentación del parlante para evitar la saturación. La señal obtenida por el micrófono no presentó diferencias significativas con la Figura 23, lo que significa que el adosarle el cerámico no influye más que en un factor de escala, como era esperable.

Se prosiguió con el ensayo incluyendo ahora los aspectos térmicos. Para ello se introdujo el micrófono dentro del alojamiento, se conectó la alimentación del ventilador y se verificó su funcionamiento. De esta forma se garantizó la existencia del flujo de aire necesario para la refrigeración. Recuérdese que en la evaluación de resultados se debe considerar la influencia del ruido acústico introducida por el ventilador.

*A posteriori* se ubicó el mechero debajo de la punta del cerámico y se encendió la llama. Durante la operación se ubicó la punta sobre la llama en el lugar donde se producía el color rojizo del cerámico más intenso.

Una de las dificultades halladas fue la de determinar unívocamente la temperatura del cerámico. Con una termocupla se verificó que el extremo del cerámico superaba los 800 °C y en algunas zonas llegaba a los 900 °C. Esto se debe a que la llama no incidió sobre él forma pareja y la turbulencia modificó el contacto entre la llama y el cerámico. Para disminuir los efectos de la turbulencia y estabilizar la llama se dispuso un medio caño alrededor del mechero. Ésta solución, junto con la regulación del caudal de gas, resultó ser eficaz para que las condiciones de calentamiento no variaran notoriamente a lo largo del tiempo. Como conclusión se estimó la temperatura promedio de la punta del cerámico en 850 °C con un error menor a 50 °C. La Figura 24 y la Figura 25 muestran el sistema durante la etapa de calentamiento y medición.

#### IV - 3.1 El calentamiento

Los cálculos de transferencia de calor realizados estimaron la temperatura ambiente en 50 °C. No fue posible simular esta condición sino que la temperatura ambiente durante el ensayo fue de 18 °C. Esta diferencia no invalida el ensayo, solo se debe notar que la distribución de temperaturas no será la misma que la calculada anteriormente en la Figura 14.



Figura 24. Fotografía del dispositivo experimental. Nótese el extremo del cerámico incandescente y la protección para estabilizar la llama.

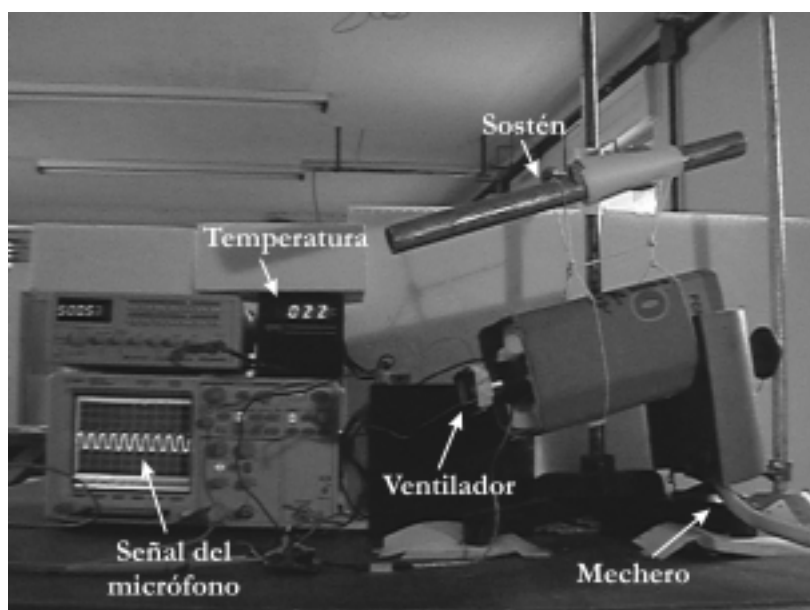


Figura 25. Fotografía del dispositivo experimental.

Basado en la estimación del tiempo de calentamiento calculado con anterioridad se registraron las temperaturas del micrófono durante 120 minutos. El resultado se presenta en la Figura 26 donde se ve un claro indicio que en el estado estacionario la temperatura del micrófono es de  $22 \pm 1$  °C, es decir, 4 °C por sobre la temperatura ambiente.

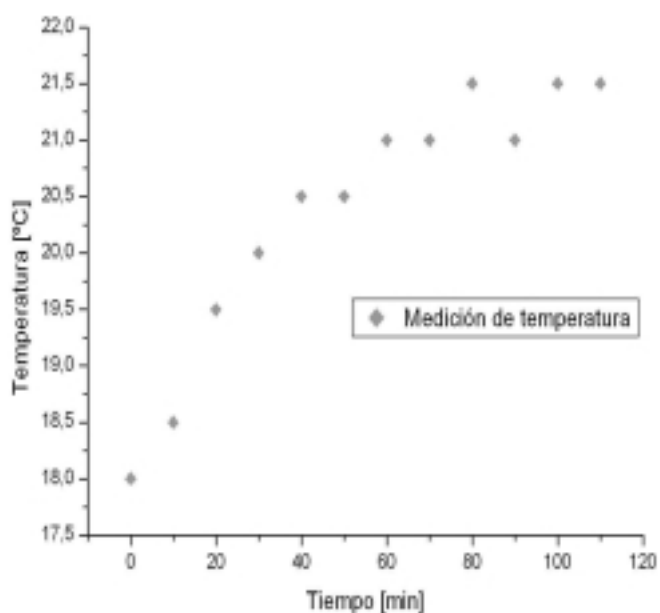


Figura 26 Variación de la temperatura del micrófono a lo largo del proceso de calentamiento.

Una vez alcanzado el estado estacionario se hicieron pruebas de funcionamiento del micrófono. Para ello se retiró la protección de la llama y se conectó el parlante con la misma señal usada anteriormente. La Figura 28 y la Figura 27 muestran la configuración utilizada.

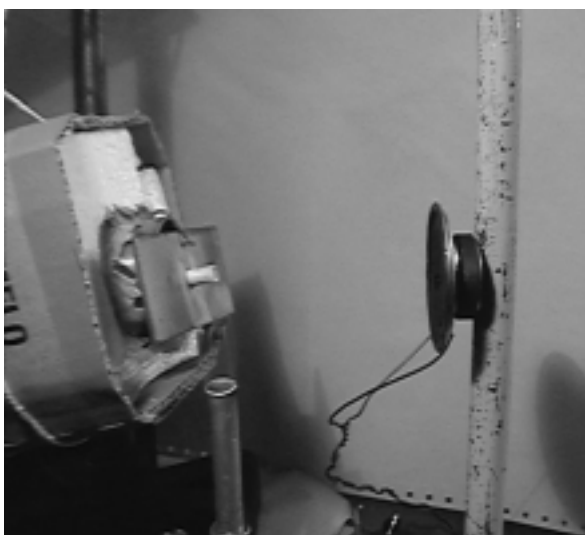


Figura 28 Detalle del cerámico y del parlante



Figura 27. Vista frontal del cerámico.

La señal registrada por el micrófono se presenta en la Figura 29 que demuestra el correcto funcionamiento del método de medición propuesto. En un extremo se hallan gases a alta temperatura con información de sonido, y esa información es registrada en el otro extremo por el micrófono. Nótese la poca

influencia de ruidos externos tanto acústicos (por ejemplo del ventilador) como eléctricos.

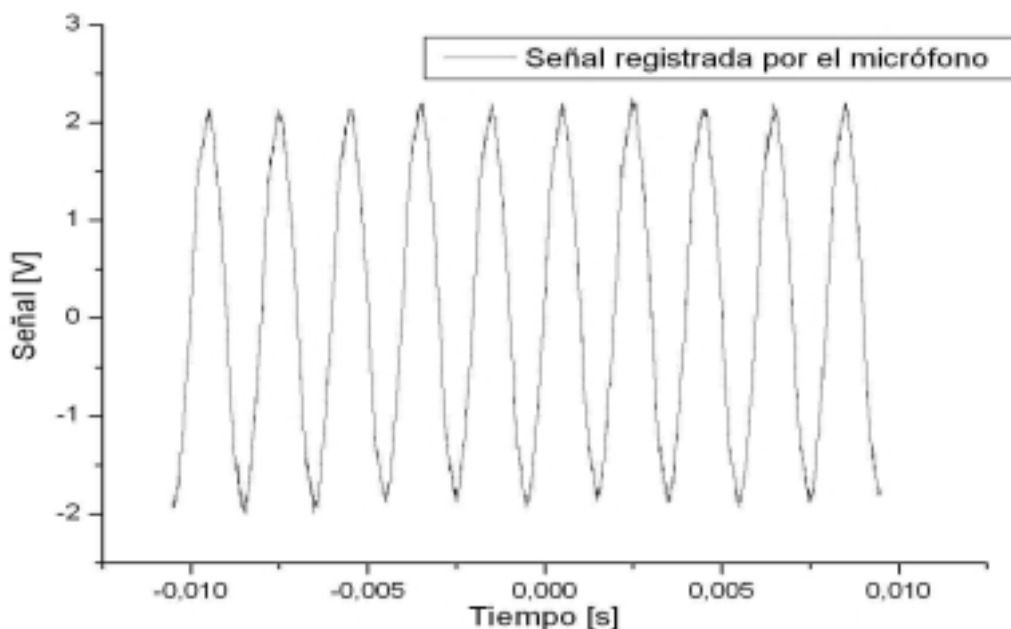


Figura 29. Señal del micrófono al ser sometido a temperatura y el parlante

Una vez comprobado el funcionamiento en las condiciones descritas se continuó proponiendo peores condiciones de funcionamiento.

#### IV - 3.2 Otras comprobaciones

Se realizaron otras comprobaciones que tienden a verificar el correcto funcionamiento y explorar la resistencia del dispositivo cuando las condiciones de trabajo se alejan de las de diseño.

- Mayor calentamiento.

Una situación en la que puede estar involucrado el dispositivo es un escape de gases que calienten su frente. Se propuso pues modificar la intensidad de la llama del mechero y aumentar el calor entregado. Con ello se pretendió calentar la cara frontal del caño que contiene al cerámico. Como resultado se obtuvo una temperatura del frente que mayormente superó los 200 °C según se registró con una termocupla. En este estado la temperatura del micrófono no superó los 35 °C, verificándose así el correcto funcionamiento de la refrigeración en condiciones peores de las de diseño.

- Comportamiento frente a frecuencias altas.

Se verificó la respuesta del sistema a frecuencias mayores a 500 Hz. Para ello se excitó el parlante con una frecuencia de 5000 Hz. La señal registrada por el micrófono se muestra en la Figura 30 que muestra un correcto funcionamiento.

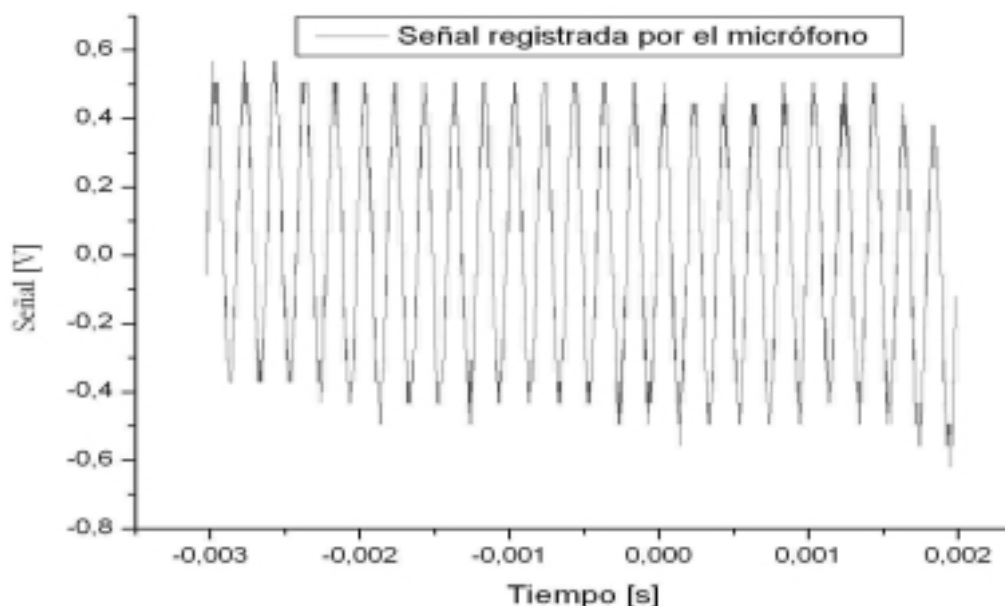


Figura 30. Señal registrada con el micrófono al ser sometido a temperatura y el parlante emitiendo una señal sinusoidal de 5000 Hz.

- Direccionalidad

En primer término se efectuaron ruidos en la periferia del micrófono y se observó que el micrófono no registraba señales significativas cuando el sonido no se generaba delante del cerámico.

Otra técnica utilizada para estudiar la direccionalidad del micrófono consistió en colocar el parlante en distintas posiciones y medir la señal registrada. Resultó que al ubicar el parlante cerca de la aislación acústica (pero sin llegar a tocarla) la señal tuvo un valor de menos de 1 V pico a pico. Al alejar el parlante de la aislación se verificó un aumento en el valor de la señal. Este comportamiento es esperable si la aislación trabaja correctamente, ya que la señal registrada corresponde a rebotes del sonido emitido por el parlante y no llega directamente a través de la aislación. Como la totalidad del cerámico está aislado acústicamente

a excepción del extremo en contacto con los gases, sólo se registrará el sonido en ellos presente.

- Otras pruebas

Una de las suposiciones del ensayo fue que los orificios longitudinales del cerámico no influyen notoriamente en la transferencia del sonido. Para verificar esto se estudió la señal del micrófono al generar ondas de presión directamente en el cerámico, y no en el aire. Para ello se golpeó muy suavemente la parte frontal del cerámico con un elemento contundente y se observó una respuesta clara en el osciloscopio. Esto significa que la onda de presión efectivamente se transmite desde el cerámico al micrófono, y no a través las pequeñas columnas de aire dentro de él.

Aquí finalizó la etapa de evaluación de conceptos. El próximo capítulo trata como son los pasos a seguir en el desarrollo de un sistema que infiera la altura de la emulsión de escoria.



## Capítulo V

### **Evaluación de la innovación y etapas futuras**

#### V - 1 Recapitulación del trabajo realizado.

El presente proyecto se dividió en cuatro etapas de trabajo: En primer término se estudió el problema de los desbordes de escoria en convertidores y las tecnologías existentes en el mercado para detectarlos. En esta fase se adquirieron conocimientos sobre: las problemáticas de la siderurgia y las tácticas utilizadas para resolverlas; técnicas matemáticas de análisis de datos y de procesamiento de señales; planificación y organización; control de experimentos y validación de resultados.

En la segunda fase se eligió la técnica a desarrollar para satisfacer las necesidades planteadas anteriormente. Se indagó sobre experiencias basadas en principios similares para estimar la factibilidad de lograr los objetivos y se diseñó un equipo de medición de sonido para gases a alta temperatura. Se realizaron cálculos teóricos que respaldan el correcto funcionamiento de la refrigeración y el bajo amortiguamiento de la señal de sonido transmitida al transductor.

En la tercera etapa se construyó el dispositivo y se realizaron ensayos a escala de laboratorio para verificar el análisis teórico y determinar otras dificultades no previstas. Con los resultados satisfactorios obtenidos se dio por finalizada la ingeniería conceptual.

Por último, en el presente capítulo se realiza una evaluación general del desarrollo y de las posibilidades de continuar con la tarea. Se considera además la facilidad para determinar un indicador del desborde de escoria que resulte útil al operador del convertidor.

#### V - 2 ¿Es el presente trabajo una innovación tecnológica?

Este trabajo desarrolla solamente un concepto innovador en la medición del ruido en gases a altas temperaturas, con la posible aplicación a un proceso

metalúrgico. En esta etapa se debe definir y construir un prototipo de planta para evaluar su desempeño, proponer mejoras y así avanzar hacia una verdadera innovación tecnológica.

### V - 2.1 ¿Cual es la razón por la cual una industria puede demandar una innovación?

En el mercado de “commodities” la tecnología de producción es la única diferenciación posible para competir entre la multitud. En particular, en la industria siderúrgica esto significa producir mayor cantidad de acero por colada y en menor tiempo. La necesidad del producto y servicio de la presente innovación se originó en la propia operación del convertidor y se trasladó a los tecnólogos del Centro Atómico Bariloche.

La demanda por la tecnología comenzó en la década de 1980, cuando aparecieron los primeros equipos para la automatización de convertidores, pero recién hacia finales de la década de 1990 se comenzó a estudiar el proceso del convertidor. Hoy en día se sigue avanzando en modelos para entender el comportamiento y métodos de control apropiados, según lo demuestran el número de publicaciones que aparecen anualmente (Algunas de estas publicaciones aparecen en la bibliografía).

Además, la extraordinaria demanda de la Republica Federal de China ha elevado en los últimos años el precio internacional del acero, propiciando con ello la inversión en mejoras y expansión de la producción. El ámbito local no está ajeno a esta situación y desde hace más de dos años, y por al menos otros dos, la industria siderúrgica argentina se encuentra incrementando su capacidad de producción.

Estas características del mercado explican el interés por innovaciones que aumenten la carga de los convertidores evitando los desbordes.

En el caso particular de los convertidores de Siderar S.A. el personal estima que uno de cada cinco procesos del convertidor posee algún grado de desborde. Esto equivale a que 9 coladas por día están afectadas por este problema. Un sistema de medición de sonido como el propuesto por el presente

proyecto junto con un correcto análisis de la señal registrada puede generar importantes beneficios económicos.

### V - 2.2 Resguardo de la propiedad intelectual

En el caso de desarrollarse el prototipo de planta se debe resguardar la posesión del concepto del medidor y de medición mediante el patentamiento y así evitar problemas legales como los mencionados en la introducción. Por esta razón se llevó a cabo una búsqueda en el registro de patentes de los Estados Unidos para conocer si existen sistemas de medición de sonido equivalentes. El resultado preliminar muestra que no hay micrófono semejantes patentados desde 1975 hasta la fecha y además que las patentes del Sonicmeter® ya están vencidas. Esta búsqueda es solo un indicio para descartar o avanzar en la posibilidad de obtener una patente y posteriormente se debe recurrir al personal especializado en el tema.

### V - 3 Etapas futuras

Hasta el momento se ha propuesto una solución conceptual al problema del nivel de escoria y se han ensayado esos conceptos satisfactoriamente en escala de laboratorio.

El paso siguiente debe ser la confección de un prototipo de planta lo cual requiere el apoyo del interesado, que aún no está confirmado. Por ello se obvió el desarrollo del prototipo y, por completitud, se estudiaron las primeras estrategias de análisis de los datos que deben ser ensayadas en planta, una vez que el equipamiento de medición esté instalado. La dificultad para obtener un primer parámetro útil al operario del convertidor podría llegar a disminuir las posibilidades de implementar el dispositivo en planta, más allá de la calidad con la que registra la señal.

#### V - 3.1 Análisis del sonido proveniente del convertidor

Una vez que el dispositivo esté disponible en la planta se debe analizar la señal registrada para obtener un indicador del apantallamiento del sonido. No es tarea del presente trabajo deducir la probabilidad de que ocurran desbordes ya que esto corresponde a los metalurgistas de planta, pero si interesa proponer los

métodos de tratamiento de la señal registrada. Durante la operación del convertidor el personal determinará, según la experiencia obtenida con el nuevo indicador, los márgenes de seguridad necesarios.

El primer paso es adquirir la señal del micrófono en una computadora a través de una placa de adquisición, o inclusive con una placa de sonido tradicional. Una vez digitalizada la señal hay diversas técnicas de tratamiento de datos para finalmente proporcionar un indicador que el operario evaluará.

### V - 3.1.1 El estado del arte

La tecnología que actualmente se utiliza registra el sonido en bandas de frecuencias predeterminadas y elegidas para cada convertidor. Según se detalla en la bibliografía [16], el espectro del sonido de los gases de escape posee frecuencias características que son las de mayor intensidad y en las cuales se verifica más claramente la variación del ruido (ver Figura 31). Recuérdese que el origen del sonido es el oxígeno que escapa de la lanza, proceso que no se puede modelar en la actualidad por su complejidad.

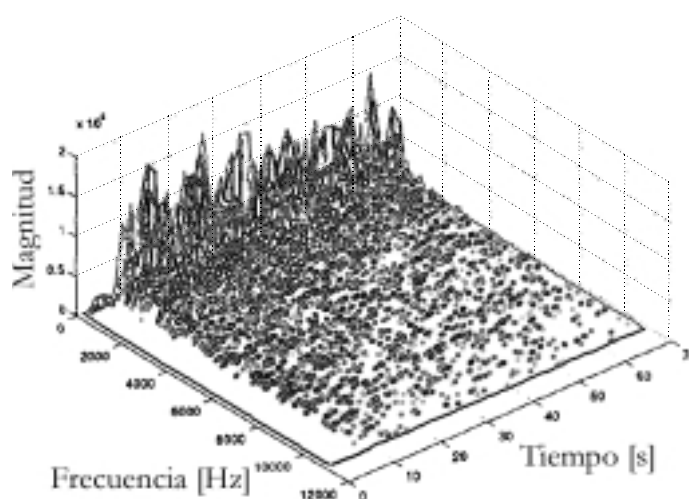


Figura 31 . Ejemplo del espectro de Fourier por ventanas del sonido registrado en un convertidor. Ref. [16]

Una vez registrada la intensidad para cada banda de frecuencia se las combina para formar una resultante. Es decir, se crea un vector donde cada dimensión representa la intensidad del sonido en una banda de frecuencia determinada. El método se basa en que la resultante del nivel del sonido, medida a lo largo de sucesivos procesos de operación del convertidor, se mantiene en un rango acotado. Conociendo los rangos normales de operación se puede asociar el valor del módulo de la resultante con la ocurrencia de desbordes. El vector diferencia entre el vector de intensidad de sonido medido en tiempo real y la

referencia histórica es un indicador de la probabilidad de ocurrencia del desborde. Luego, cuando el vector diferencia cae por debajo de cierto límite, se deben tomar las medidas de control necesarias ya que un desborde inminente es altamente probable. Para el uso de esta técnica se demostró que las bandas de frecuencias elegidas mantienen el dominio de la intensidad de sonido en el tiempo. Además, cada componente del espacio de intensidades debe tener un comportamiento semejante para que al combinarlas, su resultante de información útil.

La acción de control, típicamente modificar la altura de la lanza y en algunos casos variar el caudal de oxígeno insuflado, se llevará a cabo hasta que el vector diferencia vuelva a estar dentro del rango aceptado. Por último existe un sistema de control que permite estimar como puede variar el vector referencia de acuerdo a otros factores como pueden ser las condiciones y edad del convertidor. Este método antes detallado se utiliza actualmente y está patentado en los Estados Unidos [18].

### V - 3.1.2 ¿Que métodos de análisis se podrían emplear?

La técnica más sencilla en la cual se puede pensar consiste en promediar periódicamente la señal del micrófono e informar su valor al operario. Es una táctica simple, que no requiere mayor costo computacional y que el personal de la acería la considera valiosa como primer paso. La Figura 32 muestra la simpleza del análisis de la información del método.



Figura 32. Método de análisis de la señal de sonido más sencillo desde el micrófono hasta llegar al operario del convertidor.

El paso siguiente es dar más de un indicador, cada uno dependiente del nivel de sonido en una banda de frecuencia determinada. Para esto se requiere experimentar con el convertidor y seleccionar cuales son las bandas de frecuencias de mayor importancia. Este método requiere filtrar las señales mediante una rutina computacional. Cada banda de frecuencia tendrá sus límites de seguridad determinados por los operadores del convertidor. La Figura 33 muestra el método de análisis de la información propuesto.

La característica distintiva de este método de análisis es que permite asociar las señales de sonido de las distintas bandas de frecuencias a los distintos procesos físicos, según lo explica la bibliografía citada.

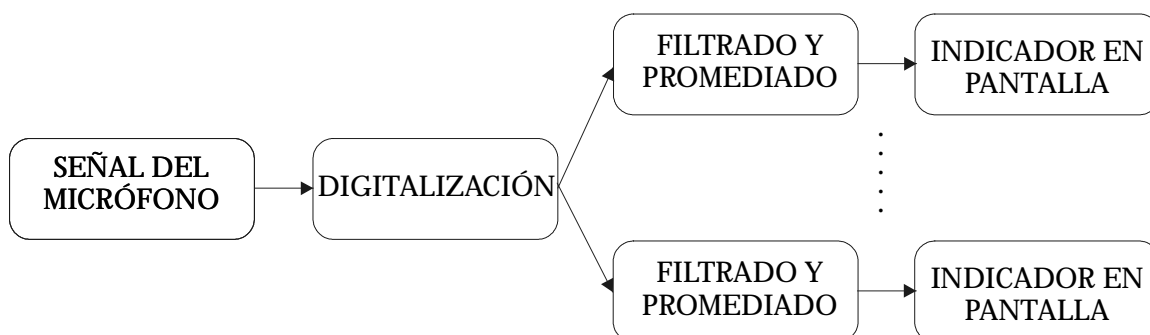


Figura 33. Método de análisis de la señal de sonido utilizando varias bandas de frecuencias predeterminadas y presentadas en forma separada.

La elección de las frecuencias dependerá de los ensayos realizados por el operador a partir de la señal registrada. Para ello se debe confeccionar un espectro de ventana, que permite observar como varía la intensidad de ruido en el tiempo, y para cada frecuencia. El promediado de sucesivos espectros ayuda a eliminar variaciones aleatorias y el operador podrá encontrar las bandas de frecuencias de mayor relevancia.

Los métodos simples hasta aquí propuestos son simplificaciones de la experiencia citada por la bibliografía. Para comprender la dificultad del análisis del sonido es necesario avanzar en el mejor entendimiento del comportamiento de la emulsión [19].

### V - 3.1.3 La emulsión

En general las emulsiones o espumas están formadas por dos fases, una gaseosa distribuida en forma de burbujas en una fase líquida. El gas puede provenir de una reacción química o bien puede ser el inyectado entre el líquido. La formación de la emulsión está generalmente afectada por la viscosidad, tensión superficial, el tamaño de las burbujas y la cantidad de gas presente. En

general se agregan químicos para incentivar la formación de la emulsión y evitar que se destruyan las burbujas formadas.

La forma en que viaja la onda de sonido a través de una espuma difiere considerablemente de cómo lo hace en gas o en líquido. La principal diferencia está en la gran atenuación del sonido al propagarse. De acuerdo con los resultados citados en la referencia 20, el coeficiente de atenuación del sonido está gobernado por la frecuencia y por la fracción de líquido en la emulsión. Cuanto mayor es la fracción de líquido, mayor es la atenuación. También se halló que las burbujas poseen un radio crítico  $r_b^*$ , en el cual cambia el mecanismo dominante de atenuación del sonido. Si el radio de la burbuja ( $r_b$ ) es menor que el crítico,  $r_b < r_b^*$ , el mecanismo principal de atenuación es la viscosidad del líquido. Si por el contrario  $r_b > r_b^*$ , la atenuación se debe a la pérdida de calor durante la compresión y expansión de la burbuja.

La fracción de líquido es controlada a su vez por la estructura de la emulsión. Se sabe que la espuma está constituida por tres estructuras: burbujas de gas, capas delgadas de líquido, y canales de interconexión. Estos canales que interconectan las burbujas con las láminas de fluido se denominan bordes de "Plateau" y son los que poseen la mayor parte del líquido. El tamaño de los bordes de "Plateau" es comparable al diámetro de las burbujas, mientras que las capas delgadas entre dos burbujas pueden tener espesores menores a  $1\mu\text{m}$ . El tamaño de las burbujas varían desde una fracción de milímetro (que son las producidas por la reacción química) hasta algunos centímetros (que provienen de la inyección del oxígeno). Además, cuando envejece la espuma y se secan los bordes de "Plateau", la burbuja cambia de ser esférica a poligonal.

#### V - 3.1.4 La interacción de la emulsión con el sonido.

La salida del oxígeno de la lanza a alta velocidad y el choque contra el baño metálico generan la estructura de la emulsión. Además, en este mismo proceso se origina el sonido que poseen los gases de escape y que se puede modelar como [16]:

$$I(h(t), \omega) = I_0 e^{-\beta_F(\omega)h(t)} \quad (42)$$

Es decir, la intensidad de sonido  $I$ , es función de la altura de la espuma  $h(t)$  (que es función del tiempo) y del coeficiente de atenuación depende de la frecuencia. La intensidad de sonido generada  $I_0$  se puede estimar al comienzo del soplado, cuando todavía no se formó la emulsión.

Como no se conoce *a priori* la dependencia del coeficiente de atenuación con la frecuencia, se utiliza luego su estimador  $\hat{\beta}_F(\omega)$  que se obtiene la experimentación.

En consecuencia se puede estimar la altura de la espuma como:

$$\hat{h}(t, \omega) = \frac{\ln(I_0) - \ln(I(h(t), \omega))}{\hat{\beta}_F(\omega)} \quad (43)$$

La complejidad inherente a la estructura de las burbujas explica la inexistencia de modelos dinámicos a partir de primeros principios, y justifica la imposibilidad de modelar la atenuación fielmente. También da evidencia de la dificultad del análisis de la señal y porqué es esencial la experimentación para hallar resultados válidos.

No se puede eliminar la dependencia con la frecuencia, por lo que de la experimentación se asocia la altura de la emulsión con una intensidad de sonido de cada banda de frecuencia. La estimación de la altura real se realiza actualmente como se mencionó al comienzo del presente capítulo, preparando un vector de intensidades de sonido y se compara su módulo con una referencia histórica.

Hay una dificultad esencial en esta forma de analizar la señal y es que trabaja con el módulo de la intensidad inicial y no puede diferenciar si los cambios en el sonido se deben a la fuente o al espesor de la emulsión. Recuérdese que a lo largo del proceso existen cambios en la altura de la lanza, caudales y otras condiciones que pueden inducir modificaciones en la intensidad del ruido generado.



### V - 3.2 ¿Como se podría subsanar el hecho que no se detecten los cambios en la fuente se sonido?

La complejidad del proceso obliga a ensayar múltiples técnicas de análisis para estudiar su eficacia y seleccionar la más conveniente. A continuación se proponen mejoras que deben ser experimentadas para validarlas, mejorarlas o descartarlas.

Se propone experimentar normalizando el nivel de sonido para cada frecuencia y comparar los cambios porcentuales. Al aumentar la emulsión, la intensidad de sonido de una frecuencia determinada disminuirá más que otra, gracias a la dependencia de la atenuación con la frecuencia. Pero si se modifica la intensidad de sonido generada, ambas señales variarán de igual modo, evitando falsas alarmas. De esta forma, al menos desde el punto de vista teórico, es factible diferenciar los cambios de intensidad de la fuente.

Esta nueva metodología de control sería equivalente a analizar no sólo la intensidad del vector diferencia ya mencionado, sino también como es la evolución de la coordenada angular.

Recuérdese que la dificultad del análisis de la señal se halla en que no se puede conocer la fuente de sonido, ya que es impensable ubicar un micrófono debajo de la escoria. ¿Pero se podría inferirla de otro modo?

Otra solución podría ser la mezcla dos de los métodos mencionados al comienzo. Se propone medir el nivel de sonido en los gases, y las vibraciones transmitidas por la lanza, pero en la dirección de su eje. Esta solución supone la existencia de dos canales de información de la fuente de sonido diferentes: La lanza y la emulsión de escoria. Ambos canales tendrán ruido pero se supone que son independientes por tratarse de dos medios distintos.

Nótese que las mediciones en la lanza no son exactamente las mismas que las que realiza la metodología existente en mercado, sino que en este caso interesa la señal en la dirección normal respecto de la utilizada por el otro método. Es decir, no interesa estimar la energía cinética de la escoria, sino utilizar la lanza como transmisor de las señales de sonido generadas dentro del convertidor.

Basados en esta idea se podría experimentar con el análisis de las señales medidas para determinar el retardo introducido por cada canal de información. La ventaja que en teoría posee esta técnica es que la señal de sonido transmitida por la lanza no se modificaría por el nivel de escoria. En cambio, esto si ocurre en la señal registrada en los gases de escape que atraviesan la emulsión. Se supone que esta diferencia ocasionaría retardos diferentes en la señales, lo cual daría indicios del riesgo de desbordes de escoria.

La Figura 34 representa el método de análisis de la señal que combina la información del sonido y de la lanza.

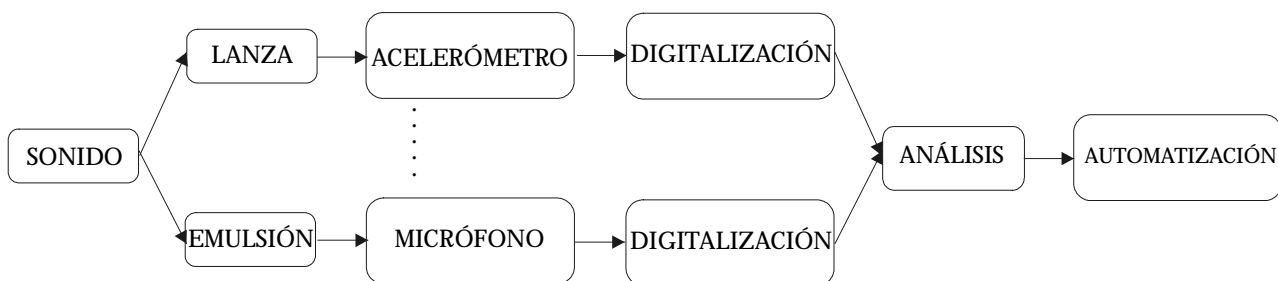


Figura 34. Método de análisis de la señal de sonido combinando con la información registrada en la lanza

## Capítulo VI

### Conclusiones

Se analizaron las tecnologías actuales de control de desbordes de escoria de los convertidores y se propusieron otras técnicas. Se estudiaron ventajas y desventajas y evaluaron las dificultades de desarrollo.

Se eligió continuar con la técnica de análisis del sonido de los gases de escape por haber demostrado ser eficaz en dispositivos ya instalados en plantas siderúrgicas. En consecuencia fue necesario estudiar el ambiente en las cercanías del convertidor y las características de los gases de escape. Como resultado se especificaron las características de diseño del ambiente que debe soportar el medidor de sonido.

Para tolerar el ambiente propuesto se diseñó un dispositivo capaz de medir el sonido en gases a altas temperaturas mediante el uso de modelos teóricos de transferencia del calor y del sonido.

Se construyó un prototipo del dispositivo para el ensayo de laboratorio en el cual se simuló una atmósfera de alta temperatura con un sonido ambiente de 500 Hz generado por un parlante. La señal medida por el dispositivo concuerda satisfactoriamente con la producida por el parlante, verificándose con ello su correcto funcionamiento. También se verificó la direccionalidad con la que el prototipo registra el sonido e inmunidad al ruido.

En estas condiciones se dio por concluida la ingeniería conceptual del medidor de sonido en atmósferas con temperaturas superiores a los 1000 °C.

La implementación de un dispositivo de planta es el primer escalón para un mayor conocimiento del proceso y de la técnica del convertidor, ayudando al control de desbordes. El análisis de la señal puede ser muy básico en un comienzo, sin dejar de ser valiosos para el operario, para luego evolucionar según las necesidades.

La gran difusión dentro de la industria de técnicas de control de desbordes da cuenta del beneficio económico que genera y justifica el desarrollo e investigación en estas áreas.

Por último no hay que descartar un rediseño del dispositivo para otras aplicaciones que requieran medir el sonido de gases a altas temperaturas.

---

## Agradecimientos

Debo agradecer primeramente a la comunidad del C.A.B. por educarme. Especialmente a Alejandra, Gabriela, Marisa, María Alejandra y Hugo de la biblioteca, cuyo apoyo y amistad allanaron el camino.

También debo mencionar a Marta Iparraguirre, por luchar por el instituto incansablemente y siempre pensar en sus alumnos.

También debo agradecer la ayuda que recibí para realizar este trabajo. En primer lugar agradezco a Claudio D' Ovidio, por toda la información que me brindó sobre cerámicos y su invaluable ayuda y apoyo.

A Darío Del Mastro y Ada Ghilarducci por enseñarme cada uno en su área.

A Germán Soja, Pedro San Filippo, y Pablo Riquelme por estar siempre dispuestos a ayudar y prestar los equipos necesarios.

A Roberto Donayo de la acería de Siderar S.A.

Al personal del laboratorio de vibraciones por permitirme trabajar en este tema.

## Bibliografía

---

- [1] [http://www.steel.org/learning/howmade/bos\\_process.htm](http://www.steel.org/learning/howmade/bos_process.htm) American Iron and Steel Institute.
- [2] Pascual A. Pezzano. Siderurgia, Buenos Aires : Librería y editorial Alsina: 1955
- [3] U.K.patent 2207, Oct 5,1858
- [4] <http://www.steelonthenet.com>. Global Steel Industry Capacity Information and Forecasts.
- [5] C. Cicutti, M. Valdez, T. Pérez, R. Donayo, J. Petroni. Estimación del espumado de las escorias durante el proceso de aceración en un convertidor LD-LBE. En: Anales SAM 1999. p. 5-9
- [6] Daniel Widlund, Alexander Medvedev, Rutger Gyllenram. Towards Model-Based Closed-Loop Control of the Basic Oxygen Steelmaking Process. En: Preprints of the 9th IFAC Symposium Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Cologne, Alemania, 1998. IFAC; 1998. p. 9-14
- [7] US Patent 4,398,948.
- [8] R. Bruckhaus, V. Fiedler, H. Lachmund. Improvement of the BOF process by use of a radar measurement at the Dillinger Hütte steelplant. La Revue de Métallurgie-CIT Juin 2001:553-559,
- [9] W. D. Kingery, H. K. Bowen, D. R. Uhlmann. Thermal Properties. En: Introduction to Ceramics. 2ª ed. N. York: John Wiley & Son; 1971. p. 583-645.
- [10] K. Balasubramanian, Vimal V. Shah, R. Daniel Costley, Gary Boudreaux, Jagdish P. Singh. High temperature ultrasonic sensor for the simultaneous measurement of viscosity and temperature of melts. Rev. of Sci. Instr. December 1999;70 (12):4618-4623
- [11] US Patent 4,098,128.
- [12] F. P. Incropera, D. P. De UIT. Conducción unidimensional de estado estable. En: Fundamentos de transferencia de calor 4ª ed. México: Prentice Hall; 1999. p. 73-160.
- [13] S. N. Rschevkin. Transmission of sound through plane boundaries and layers. En: A course of lectures on the theory of sound. Oxford: Pergamon Press; 1963. p. 43-70.

- 
- [14] K. J. Singh, Y. Matsuda, K. Hattori, H. Nakano, S. Nagai. Non-contact sound velocities and attenuation measurements of several ceramics at elevated temperatures. *Ultrasonics* 2003; 41:9–14
- [15] Y. A. Çengel, M. A. Boles. *Thermodynamics, an engineering approach*, 3<sup>a</sup> ed. Boston : McGraw Hill; 1998.
- [16] Wolfgang Birk, Ioannis Arvanitidis, Pär Jönsson and Alexander Medvedev. Physical Modelling and Control of Dynamic Foaming in an LD-Converter Process. *IEEE*. 2000. p. 2584-2590.
- [17] R Schaller, G. Fantozzi, G. Gremaud. *Mechanical spectroscopy  $Q^{-1}$  2001 with applications to Material Science*. Switzerland: Trans Tech publications; 2001
- [18 ] U.S. Patent 5,028,258
- [19] Sergey V. Komarov. Mamoru Kuwabara, Masamichi Sano. Control of Foam Height by Using Sound Waves. *ISIJ Internacional* 1999; 39(12):1207-1216.
- [20] Andreas Johansson, Alexander Medvedev and Daniel Widlund. Model-Based Estimation of Metal Analysis in Steel Converters. *Proceedings of the 39 IEEE Conference on Decision and Control*. Sydney, Australia; December 2000. p. 2029-2034.