



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO DE SISTEMAS DE  
CALENTAMIENTO DE FLUIDOS BASADOS EN RESISTENCIAS ELÉCTRICAS,  
INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y CALDERAS DIÉSEL.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCION ELÉCTRICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**JAVIER RENATO URBINA FUENTES**

**PROFESOR GUÍA:  
SR. MANUEL DUARTE MERMOUR**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SR. NICOLÁS BELTRÁN MATURANA  
SR. RICARDO FUENTES FUENTEALBA**

**SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2010**

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
GRADO DE MAGÍSTER EN CS. DE LA  
INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA Y EL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: JAVIER URBINA FUENTES  
FECHA: 29 DE MARZO DE 2009  
PROF.GUÍA: SR. MANUEL DUARTE MERMOUD

**“ESTUDIO COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE FLUIDOS BASADOS EN RESISTENCIAS ELÉCTRICAS, INDUCCION MAGNÉTICA Y CALDERAS DIÉSEL.”**

El presente trabajo de tesis es un estudio comparativo técnico-económico de tres sistemas de calentamiento de fluidos a través de resistencias eléctricas, calderas diésel e inducción magnética. El objetivo principal de este trabajo es establecer las ventajas comparativas de cada sistema de calentamiento de fluidos de pasada, verificando bajo qué condiciones un sistema resulta superior a los otros.

Para ello se desarrolló una metodología de comparación, la que requirió determinar las características más importantes de cada sistema. Ésta toma en cuenta las características del fluido a calentar, la precisión del control de temperatura, el rendimiento energético de los equipos y su vida útil, la existencia de puntos calientes, las dimensiones geométricas, la contaminación, el efecto del medio ambiente sobre los equipos, la confiabilidad de los sistemas, los costos de inversión (tanto de los equipos de calentamiento como de los equipos auxiliares) y los costos de operación, mantenimiento y personal de operación, entre otros.

En base al estudio realizado, se estableció que los sistemas resistivos son una opción óptima para medianas potencias (hasta 10[MW]) debido a que la operación de calentamiento de fluidos con energía eléctrica resulta más económica y eficiente en comparación a los otros sistemas estudiados. Presenta además ventajas en aplicaciones en donde esté disponible el espacio suficiente para su instalación y en procesos no críticos, es decir, donde no se requiere de elementos duplicados de seguridad para mantener el proceso de calentamiento disponible en todo momento. Los sistemas de calentamiento con calderas son ventajosos en aplicaciones de gran potencia (sobre 10 [MW]), requieren de la instalación de un circuito cerrado de agua, y no son recomendables en ambientes extremos (operación en altura y con variaciones de temperatura importantes). El sistema inductivo de calentamiento es la mejor solución en situaciones en donde exista una tubería en funcionamiento por la que circula el fluido a calentar, donde haya restricciones de espacio, donde no sea posible modificar los elementos existentes instalados y donde se requiera de un control preciso de temperatura con respuestas rápidas frente a perturbaciones. Además, es mucho más fácil adaptarlo a diferentes tipos de fluidos, con variaciones de diseño mínimas.

Para una aplicación minera, como son los procesos de biolixiviación y electro-obtención, el calentamiento inductivo se presenta como un método eficaz y ventajoso económicamente, con un control preciso de la temperatura que responde rápidamente ante cambios del flujo de solución o cambios en la temperatura de entrada del fluido. Las dimensiones compactas del equipo permiten instalarlo en la sección final de las tuberías de riego, eliminando las pérdidas de calor por las tuberías (a diferencia de lo que ocurre en el caso de instalación de una caldera diésel) aumentando la eficiencia del proceso. La instalación de una caldera diésel para este tipo de aplicaciones no es tan recomendable, ya que genera costos mayores en consumo de energía, requiere de operadores de calderas para un proceso que no lo justifica, y además es una solución contaminante. La instalación de resistencias eléctricas requiere de la configuración de un sistema de circuito cerrado de agua, con pérdidas en los distintos elementos que la componen, un mantenimiento mayor de los equipos y un peor control de la temperatura de la solución.

*A mis padres,  
mi familia  
y mis amigos.*

## Agradecimientos

Sin lugar a dudas, la lista de personas a quien agradecer la colaboración, el apoyo y la paciencia que me permitieron finalizar este largo proceso es muy larga. Por supuesto, las primeras personas en la lista son mis padres, que gracias a su esfuerzo lograron darme una educación de excelencia. Gracias a toda mi familia, por el apoyo infinito y la paciencia en épocas difíciles, en donde el estudio era de sol a sol y mi presencia era escasa. Muchas gracias también a ti Bebe, que me acompañaste todos estos años, me viste sonreír y llorar, me apoyaste siempre, y con tu compañía la vida se hacía mucho más dulce.

Quisiera agradecer también a toda la gente de Beauchef que me permitieron crecer como persona: amigos de otras carreras, gente del departamento de comunicaciones (ex difusión), y por supuesto profesores del DIE.

Como olvidar a todo el equipo del proyecto Fondef, que trabajando codo a codo (o espalda con espalda según la configuración de las sillas) llevamos adelante este proyecto de la universidad en aquel escondido laboratorio. Gracias Ian, Inés, Eliana, Emmanuel, Magdalena, Marco, Rodrigo y Vader. También agradecer a Franco y Felipe por su vikingo memorable.

Agradecer también a los profesores que guiaron este trabajo de Tesis, que debido a su impecable metodología y dedicación, me entregaron todas las herramientas para lograr resultados: gracias profesor Manuel, profesor Nicolás y profesor Ricardo.

Cabe también mencionar agradecimientos a la Universidad Federico Santa María, a la empresa IDT y Anglo American por su gentileza y apoyo en los datos necesarios para la investigación. Gracias también a Maria Isabel por acogerme y apoyarme en el proceso final.

Finalmente, agradecer a este incomparable grupo de amigos y compañeros eléctricos, que hasta el día de hoy sigue siendo un grupo sin igual. Gracias por esos momentos de felicidad y apoyo a Carlitos, Edrian, Germán, Josh, Loro, Lucho, Medel, Man, Mati, Mic, Milko, Nico, Yung, y Waraldo, con mención especial para mis compañeros de colegio Leo y Felipe que comenzamos y terminamos de la misma manera.

... It's a long way to the top (If you wanna Rock 'n'roll).

# Índice General

Índice de Figuras.....	8
Índice de Tablas.....	11
<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>12</b>
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Breve Reseña de los Sistemas de Calentamiento de Fluidos Estudiados.....	14
1.3 Revisión de las Características Técnicas de los Sistemas de Calentamiento y Metodologías de Comparación.....	16
1.4 Objetivos y Metodología.....	17
1.4.1 Objetivos generales.....	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.4.3 Metodología de trabajo.....	18
1.5 Resultados Obtenidos.....	19
1.5.1 Metodología de comparación de sistemas de calentamiento.....	19
1.5.2 Resultados obtenidos en base a la comparación.....	20
1.6 Estructura de la Tesis.....	21
<b>Capítulo 2 Sistema de Calentamiento Resistivo.....</b>	<b>22</b>
2.1 Calentadores Resistivos Tubulares de Inmersión.....	23
2.1.1 Descripción general.....	23
2.1.2 Dimensiones.....	25
2.1.3 Densidad de potencia.....	26
2.1.4 Materiales típicamente usados en la fabricación de calentadores tubulares.....	27
2.2 Calentadores Resistivos con Flange (o Brida).....	34
2.2.1 Descripción general.....	34
2.2.2 Dimensiones.....	36
2.3 Calentadores Resistivos con Flange en Aplicaciones en Estanques.....	37
2.3.1 Descripción general.....	37
2.3.2 Dimensiones.....	37
2.4 Calentadores Resistivos con Flange en Aplicaciones de Flujo de Pasada (Calentadores de Circulación).....	38
2.4.1 Descripción general.....	38
2.4.2 Dimensiones.....	39
2.5 Equipos de Control de Sistemas de Calentamiento Resistivo.....	40
2.5.1 Control de una fase.....	41
2.5.2 Control de dos a cuatro fases.....	41
2.5.3 Control de una a doce fases.....	42
2.5.4 Rectificadores controlados de silicio (SCR, Silicon Controlled Rectifiers).....	44
2.5.5 Control mixto con contactores y SRC.....	47
2.5.6 Control con SCR.....	48
2.6 Eficiencia de los Calentadores Resistivos de Inmersión.....	49
2.7 Vida Útil de los Calentadores Resistivos de Inmersión.....	49

2.8 Costos a Considerar en el Uso de un Sistema con Resistencias Eléctricas.....	52
2.9 Disponibilidad de los Equipos y Fallas Típicas .....	52
<b>Capítulo 3 Sistema de Calentamiento con Calderas Diésel.....</b>	<b>54</b>
3.1 Descripción general.....	55
3.2 Aspectos Técnicos Importantes en el Diseño y Operación de Calderas .....	57
3.3 Eficiencia de la Caldera de Agua Caliente.....	59
3.3.1 Pérdidas en la caldera de agua caliente.....	61
3.3.2 Pérdidas de calor sensible por gases secos de escape .....	62
3.3.3 Pérdidas por la producción de vapor de agua.....	77
3.3.4 Pérdidas por radiación y convección.....	79
3.4 Equipos de Control de Sistemas de Calderas.....	80
3.5 Costos a Considerar en el Uso de un Sistema de Calderas .....	81
3.6 Disponibilidad de los Equipos y Fallas Típicas .....	82
<b>Capítulo 4 Sistema de Calentamiento Inductivo .....</b>	<b>85</b>
4.1 Sistema de Calentamiento de Fluidos de Pasada por Inducción Magnética.....	86
4.1.1 Descripción general .....	86
4.1.2 Sistema eléctrico .....	89
4.1.3 Bobina inductora.....	90
4.1.4 Susceptor .....	92
4.2 Intensidad de Campos Magnéticos en las Cercanías.....	95
4.3 Eficiencia del Equipo de Calentamiento Inductivo .....	95
4.4 Equipos de Control de Potencia de Sistemas de Calentamiento Inductivo .....	97
4.5 Disponibilidad de los Equipos y Fallas Típicas .....	98
4.6 Costos a Considerar en el Uso de un Sistema Inductivo.....	99
<b>Capítulo 5 Estudio Comparativo Técnico-Económico de Sistemas de Calentamiento de Fluidos con Resistencias Eléctricas, Calderas Diésel e Inducción Magnética.....</b>	<b>100</b>
5.1 Configuración de los Sistemas de Calentamiento.....	102
5.1.1 Eficiencia de los equipos.....	103
5.1.2 Eficiencia global del sistema.....	104
5.1.3 Costos de inversión.....	105
5.1.4 Costos de operación anual.....	109
5.1.5 VAN de costos .....	112
5.2 Sistemas Configurados para Procesos Críticos .....	114
5.2.1 Eficiencia global del sistema.....	115
5.2.2 Costos de inversión.....	116
5.2.3 Costos de operación anual.....	118
5.2.4 VAN de Costos .....	119
5.3 Análisis de Costos de los Sistemas de Calentamiento con Precio de la Energía Variable a Mediano Plazo.....	122
5.3.1 Estimaciones y proyecciones de los energéticos .....	122
5.3.2 VAN de costos con precio de la energía variable.....	129
5.4 Comparaciones Técnicas de los Sistemas de Calentamiento de Fluido .....	131
5.5 Comparaciones Económicas de los Sistemas de Calentamiento de Fluido.....	136

<b>Capítulo 6 Conclusiones y Trabajo Futuro .....</b>	<b>138</b>
6.1 Conclusiones Generales .....	138
6.2 Trabajo Futuro.....	141
<b>Referencias .....</b>	<b>142</b>
<b>Anexo A. Estudio de Puntos Calientes y Homogeneidad de la Temperatura del Fluido en Calentamiento Resistivo.....</b>	<b>150</b>
A.1. Descripción de los Elementos.....	150
A.2. Caso 1: Flujo de 83 [l/min]. Potencia entregada: 4[kW].....	153
A.3. Caso 2: Flujo de 83 [l/min]. Potencia entregada: 40[kW]. .....	163
A.4. Caso 3: Flujo de 8 [l/min]. Potencia entregada: 20[kW].....	173
A.5. Caso 4: Simulación Calentador Resistivo de pasada de 50[kW] .....	178
A.6. Conclusiones .....	184
<b>Anexo B. Costos Operacionales Anuales de Sistemas de Calentamiento.....</b>	<b>186</b>
<b>Anexo C. Pérdidas en las Tuberías .....</b>	<b>192</b>

# Índice de Figuras

Figura 1. Componentes de calentador tubular.....	23
Figura 2. Componentes principales de calentador tubular .....	24
Figura 3. Algunas formas estándar de arqueado .....	25
Figura 4. Variaciones en la resistividad eléctrica debido a la temperatura en Nichrome y cobre. ....	28
Figura 5. Variación de la conductividad térmica del Nichrome con la temperatura.....	29
Figura 6.a. Conductividad térmica Mgo. ....	31
Figura 7.a. Variación con la temperatura de la resistividad eléctrica y del Incoloy. ....	33
Figura 8. Calentador con flange.....	34
Figura 9. Diferentes tipos de caja de conexiones.....	35
Figura 10. Flange con Stand-off. ....	36
Figura 11. Calentador con Flange de 1[MW].....	36
Figura 12. Calentador con Flange utilizado en Estanque. ....	37
Figura 13. Calentador con flange para fluidos de pasada.....	38
Figura 14. Diagrama de configuración interna de calentador de circulación.....	38
Figura 15. Calentadores de Circulación en Serie.....	39
Figura 16. Sistema de control con un contactor.....	41
Figura 17. Esquema de control de 2 fases.....	42
Figura 18. Esquema de control multi-fase. ....	43
Figura 19. RFI generado en el accionamiento de un contactor mecánico. ....	44
Figura 20. Diagrama general de SCR.....	44
Figura 21. Contaminación Armónica.....	46
Figura 22. Diagrama de control mixto contactores y SCR. ....	47
Figura 23. Diagrama de control SCR.....	48
Figura 24. Vida útil v/s temperatura de la resistencia (típica). ....	50
Figura 25. Diagrama de caldera pirotubular. ....	55
Figura 26. Componentes principales de caldera de 3 pasos. ....	56
Figura 27. Tendencia de la cantidad de CO <sub>2</sub> según exceso de aire. Caso Diésel dodecano.....	68
Figura 28. Tendencia general de la relación entre exceso de aire y pérdidas por la chimenea .....	71
Figura 29. Tendencia lineal de pérdidas de calor sensible. Exceso de aire mayor a 1. ....	72
Figura 30. Tendencia lineal de pérdidas de calor sensible por Combustión Incompleta.....	73
Figura 31. Tendencia de pérdidas de calor sensible en función del exceso de aire.....	74

Figura 32. Variación de la presión atmosférica con la temperatura. ....	75
Figura 33. Esquema básico de control de una caldera. ....	80
Figura 34. Principio de calentamiento inductivo ....	85
Figura 35. Diagrama de funcionamiento de Calentador inductivo.....	87
Figura 36. Esquema general del sistema de Calentamiento Inductivo.....	88
Figura 37. Diagrama del Sistema Eléctrico .....	89
Figura 38. Desarrollo de equipos de electrónica de potencia. Fuente: Power Electronics. Mohan, Undeland, Robbins. Editorial Wiley-India. 2007.....	90
Figura 39. Diseño de bobina inductora con fijadores. ....	92
Figura 40. Configuración del susceptor.....	93
Figura 41. Detalle de la conformación del susceptor .....	93
Figura 42. Susceptor con cruceas de anclaje.....	94
Figura 43. Diagrama simplificado del subsistema eléctrico .....	97
Figura 44. Sistema Resistivo/Caldera Diésel analizado para el estudio comparativo de calentamiento de agua.....	101
Figura 45. Sistema inductivo analizado para el estudio comparativo calentamiento de agua.....	101
Figura 46. Diagrama simplificado de configuración de los sistemas de calentamiento resistivo y caldera diésel.....	106
Figura 47. Comparación de Costos de Inversión Sistemas Resistivo y Caldera.....	108
Figura 48. Comparación de costos de inversión sistemas resistivo, caldera e inductivo.....	108
Figura 49. Comparación de Costos de Operación.....	111
Figura 50. Costos de operación anuales con energía eléctrica a 80 USD/MWh.....	112
Figura 51. VAN de costos para sistemas de 500kW.....	113
Figura 52. VAN de costos para sistemas de 1MW. ....	114
Figura 53. Comparación de Costos de Inversión Sistemas Resistivo, Caldera e Inductivo con criterio de seguridad n-1.....	116
Figura 54. Comparación de Costos de Operación sistemas con criterio de seguridad n-1. ....	118
Figura 55. Costos operacionales de sistemas de 500kW considerando energía eléctrica a 80USD/MWh .....	119
Figura 56. VAN de costos de sistemas con criterio de seguridad n-1 para 500kW. ....	120
Figura 57. VAN de costos de sistemas con criterio de seguridad n-1 para 1[MW]. ....	121
Figura 58. Valores de CPI año 1988 al presente y regresión lineal. ....	123
Figura 59. Valores de CPI año 1988 al 2029.....	124
Figura 60. Estimación de los precios de la Tonelada de Carbón hasta el año 2029. ....	125
Figura 61. Estimación del precio de la energía eléctrica en USD/MWh.....	126

Figura 62. Precio del Barril de Petróleo.....	127
Figura 63. Precio de Paridad del Diésel y Precio del Crudo.....	128
Figura 64. Precios estimados del diésel (paridad) y petróleo crudo.....	129
Figura 65. VAN de costos de sistemas de 500kW considerando costo variable de la energía.....	130
Figura 66. VAN de costos de sistemas de 1MW considerando costo variable de la energía.....	131

# Índice de Tablas

Tabla 1. Densidades de potencia recomendados para diferentes materiales a calentar. Ref: [11] .....	26
Tabla 2. Propiedades físicas y eléctricas del Nichrome y cobre.....	27
Tabla 3. Propiedades físicas y eléctricas del MgO. (Ref: [26] [75] [76] ).....	30
Tabla 4. Propiedades físicas y eléctricas del Incoloy, cobre y acero 304 y 316. (Ref:[28] [61] ) .....	32
Tabla 5. Propiedades del Incoloy 800 envejecido [37] . .....	51
Tabla 6. Dimensiones típicas de calderas diésel. Elaboración propia en base a diversas empresas. ..	57
Tabla 7. Valores Poder Calorífico Inferior y Superior [52].....	60
Tabla 8. Cantidad de O <sub>2</sub> necesario para combustión de C, H y S. [58].....	63
Tabla 9. Constituyentes de Combustibles y cantidad de CO <sub>2</sub> en combustión [58] .....	66
Tabla 10. Peso molecular de gases. Ref: [84] .....	68
Tabla 11. Calor específico de gases. Ref: [85] .....	69
Tabla 12. Pérdidas de calor por cada tipo de gas de escape. ....	69
Tabla 13. Volumen de aire calculado a 5000 msnm que contienen 88,06 [mol]. ....	76
Tabla 14. Densidad de aire calculado a 5000 msnm que contienen 88,06 [mol]......	76
Tabla 15. Porcentaje de pérdidas por vapor de agua en función.....	78
Tabla 16. Porcentaje de pérdidas de calor por radiación en función de la carga de la caldera. ....	79
Tabla 17. Eficiencias energéticas de equipos de calentamiento. ....	103
Tabla 18. Pérdidas de calor considerados en elementos de sistema cerrado de agua. ....	104
Tabla 19. Costos en USD del sistema resistivo de calentamiento según cotizaciones. ....	106
Tabla 20. Costos en USD del sistema con calderas diésel de calentamiento según cotizaciones. ....	106
Tabla 21. Costos en USD del sistema inductivo de calentamiento según cotizaciones. ....	107
Tabla 22. Costo Total para cada sistema de calentamiento, según potencia nominal. ....	107
Tabla 23. Costos Totales de inversión de sistemas. Caso con criterio de seguridad n-1.....	116
Tabla 24. Dimensiones de tecnologías.....	133

# Capítulo 1

## Introducción

El calentamiento de fluidos está presente en diversos ámbitos de la industria actual, encontrando aplicaciones en la industria química, farmacéutica, de alimentos, refinación de petróleo, hotelera y gran minería, sólo por nombrar algunas.

Actualmente el mercado dispone de variadas alternativas para el calentamiento de fluidos, existiendo una apropiada solución para cada aplicación. Entre las soluciones se encuentran: el calentamiento por resistencias eléctricas, por microondas, por calderas a combustibles (diésel, gas, petróleo, biomasa), por energía solar, por reacciones químicas, entre otras. De éstas, se utilizan principalmente 2 para la gran mayoría de las aplicaciones actuales: el calentamiento a través de resistencias eléctricas y por medio de calderas a combustible. Recientemente se ha desarrollado una nueva técnica de calentamiento de fluidos [35] [53] [55] [67] [82] , que se basa en una solución utilizada hace años en la industria de tratamiento y fundición de metales. Se trata del calentamiento de fluidos a través de inducción magnética, el cual se presenta como un método novedoso y eficaz de calentamiento de pasada (sin estanques de acumulación). Hoy día existen muy pocas empresas especializadas que ofrecen a sus clientes este tipo de calentamiento de fluidos.

Cada una de las alternativas de calentamiento mencionadas anteriormente posee características que las hacen ventajosas bajo ciertas circunstancias y aplicaciones, tanto en el aspecto técnico como en el aspecto económico. Así, el presente trabajo de tesis estudia las características principales de los sistemas de calentamiento de fluidos basados en resistencias eléctricas, inducción magnética y calderas diésel, y propone una metodología de comparación de sistemas de calentamiento tanto en el ámbito técnico como económico, analizando un caso de estudio en particular.

## 1.1 Antecedentes

En la industria actual, mejorar los procesos productivos con costos cada vez menores es el principal incentivo para el progreso de la tecnología. El calentamiento de fluidos es un proceso en el cual se requiere entregar una cantidad de energía en forma de calor para así aumentar la temperatura de un fluido. Este proceso se puede enfocar desde dos puntos de vista: el técnico y el económico.

Para que el calentamiento del fluido sea un proceso eficaz, se requiere saber de qué manera entregar el calor al mismo. Ello depende de su estado físico (sea sólido, líquido o gaseoso), su capacidad de conducir el calor (conductividad térmica), su capacidad de aumentar su temperatura (calor específico), su velocidad, la necesidad o no de controlar la temperatura del fluido, y muchos otros factores. Además, se requiere que la transferencia de calor tenga un impacto mínimo en el ambiente. Aquél es el problema técnico, el cual en la actualidad es solucionado de diferentes formas: con resistencias eléctricas inmersas en el fluido las cuales disipan calor, resistencias eléctricas colocadas en contacto con los contenedores o tuberías, calderas de combustible, acumuladores de energía solar, intercambiadores de calor, entre otros.

En relación a los aspectos económicos, la energía calórica es una forma de energía que se puede obtener de variadas fuentes, como por ejemplo: solar, geotérmica, nuclear, carbón, petróleo o electricidad. La principal fuente energética en el mundo sigue siendo el petróleo y sus derivados. En Chile, el balance energético nacional del año 2008 muestra que la fuente mayoritaria de energía son los derivados del petróleo con un 49,5% (y un 25,3% corresponde a Diésel), seguido de la electricidad con un 13,5%. En particular, el sector industrial y minero consume un 38,8% en los derivados del petróleo, mientras que un 34% en electricidad [32].

Así, el costo de la energía es un problema que actualmente tienen muy presente en la industria, debido a que la alternativa del petróleo y gas cada vez son más costosas. Es por ello que cobra cada vez más importancia la eficiencia de los procesos de calentamiento, el cual genera ahorros operacionales que pueden resultar muy importantes para una industria en particular. Éste es el problema económico, el cual debe tomar en cuenta no sólo la eficiencia del proceso, sino también la inversión en tecnologías eficientes que permitan procesos con costos operacionales que en ciertos horizontes de tiempo sean convenientes.

Debido a la gran cantidad de alternativas que existen actualmente para el calentamiento de fluidos, se debe buscar la opción que presente una mayor eficiencia, eficacia y costo mínimo para una aplicación en particular. Por ejemplo, en la gran minería del cobre el calentamiento de fluidos es parte importante en diversos procesos productivos, necesitándose calentamiento de agua y

soluciones de proceso para las operaciones de electro-obtención, electro-refinación y biolixiviación, entre otras. El agua caliente se utiliza en el proceso de electro-obtención y electro-refinación para el lavado de cátodos con el fin de remover los restos de materiales e impurezas que pudieran haber quedado adheridos en el proceso. La solución electrolítica en las operaciones electrometalúrgicas debe calentarse en torno a los 45-55°C para así aumentar la velocidad de producción de los cátodos, maximizando la recuperación de cobre [78] . Aquel proceso debe realizarse bajo variaciones de la temperatura ambiente y de la producción del momento. En las operaciones de biolixiviación actúan bacterias acidófilas las cuales catalizan la disolución de los minerales, cuya actividad es altamente dependiente de la temperatura a la que se encuentren. Se requiere entonces aumentar la temperatura de la solución de refinación con la cual se riegan las pilas o botaderos, en el intervalo de 20-30°C para maximizar dicha catálisis [17] [79] . Sin embargo dicho calentamiento no es posible realizarlo por métodos donde las bacterias encargadas del proceso son destruidas, como ocurre por ejemplo con microondas. Además, en Chile la mayor parte de estos procesos se realizan en la cordillera de Los Andes, por lo que la alternativa de una caldera diésel tiene muchas desventajas tanto desde el punto de vista técnico como ambiental.

Se propone entonces una metodología de comparación de sistemas de calentamiento de fluidos, que tome en cuenta los aspectos técnicos y económicos, y que permita en primer lugar tener una información completa y balanceada de los diferentes sistemas de calentamiento, y en segundo lugar que ofrezca una visión global de las ventajas y desventajas que posee cada sistema, para así tomar una decisión adecuada en una aplicación en particular.

En este contexto, se realizará un caso de estudio que permita comparar sistemas de calentamiento de fluidos de pasada basados en resistencias eléctricas, inducción magnética y calderas diésel, estableciendo cuáles son sus características técnicas relevantes, y analizando sus costos de inversión y operación anuales, bajo horizontes de evaluación de 5, 10 y 20 años, observando su evolución y variaciones con respecto al precio de los energéticos.

## **1.2 Breve Reseña de los Sistemas de Calentamiento de Fluidos Estudiados**

El método de calentamiento de fluidos a través de resistencias eléctricas, así como también a través de calderas de combustión, actualmente se encuentran muy desarrollados y tecnificados. Estas soluciones se utilizan desde hace años en la industria, presentando soluciones específicas para cada aplicación. En general, se conocen muy bien las características distintivas de cada uno para una aplicación dada, sin embargo no sucede lo mismo con el método a través de inducción magnética, debido a que es una solución reciente.

El calentamiento con resistencias eléctricas se basa en el efecto Joule, donde el calor es generado en elementos resistivos tubulares y por procesos de conducción, convección y radiación es transferido hacia el fluido. Los sistemas se caracterizan por sumergir la resistencia eléctrica en el fluido a calentar, y son llamados comúnmente en la industria como Calentadores Resistivos de Inmersión (Immersion Heaters). Son muy eficientes (del orden de un 95-98%) y requieren de una mínima mantención para su operación. Las empresas que ofrecen elementos resistivos tubulares se ubican principalmente en Estados Unidos, Francia, España y Alemania desde la década de 1960. En Chile, existen unas cuantas industrias especializadas en la fabricación de resistencias eléctricas para calefacción desde la década de 1970, principalmente enfocada a la gran industria, como por ejemplo la industria minera. Más amplio es el espectro de empresas que venden calefactores eléctricos, los cuales actualmente en Chile se pueden encontrar masivamente.

Los sistemas de calentamiento a través de calderas a combustibles fósiles han sido extensamente usados desde la época de la revolución industrial. Su uso principal es la generación de vapor de agua para plantas eléctricas, generación de calor, proveer de energía a procesos químicos, procesos alimenticios, o simplemente calefacción de agua. Éstos requieren de equipos anexos para su implementación, como intercambiadores de calor, bombas de recirculación y estanques de expansión, por nombrar algunos. Requieren de una alta mantención, elementos especiales de seguridad y operadores especializados, además de ser una alternativa contaminante del medio ambiente. En Chile existe una cantidad importante de empresas fabricantes de calderas, tanto de vapor como de agua caliente, con soluciones específicas según la aplicación. También se encuentra un gran número de empresas representantes de fabricantes extranjeros e importadores de variadas firmas, las cuales ofrecen no sólo calderas, sino también repuestos, servicios de asesoría, instalaciones, y servicios de mantención.

El sistema de calentamiento de fluidos por medio de inducción magnética se basa en el fenómeno de inducción de corrientes eléctricas en un susceptor (medio conductor) sometido a un campo magnético alterno en el tiempo. Dichas corrientes generan calor debido al efecto Joule en el conductor. Este sistema de calentamiento se compone de una fuente de campo magnético alterno de frecuencia media y un susceptor magnético inmerso en el fluido, el cual permite transferir la energía que proviene del campo electromagnético en forma de calor. Este novedoso sistema de calentamiento de fluidos posee ventajas destacables, entre las cuales se puede mencionar su alta densidad de potencia, menor costo de mantenimiento y la controlabilidad de la temperatura, especialmente en calentamiento de fluidos de pasada. El calentamiento de fluidos por este método no existe en Chile, y en el mundo son pocas las empresas especializadas que ofrecen esta alternativa.

La información de las características de los sistemas de calentamiento se encuentra disponible de manera incompleta y dispersa por parte de las empresas fabricantes. La información técnica que no está disponible se obtuvo en base a simulaciones y modelos teóricos, con el objetivo de lograr una información simétrica y comparable de las tres alternativas estudiadas en el presente trabajo.

### **1.3 Revisión de las Características Técnicas de los Sistemas de Calentamiento y Metodologías de Comparación**

En general, la información sobre las características técnicas de los equipos de calentamiento de fluidos es escasa y se encuentra dispersa tanto en libros como en catálogos de fabricantes.

Para los equipos de calentamiento resistivos, la mayor parte de la información se encuentra en catálogos de productos. Las grandes empresas poseen catálogos en línea con bastante información técnica, como dimensiones, materiales, eficiencias, niveles potencias y tensiones, caja de terminales, tipo de fluidos a calentar, entre otros [18] [19] [21] [23] [27] [30] . También está disponible información sobre mantenciones, instalaciones y operación de los equipos. Sin embargo, la mayor dificultad es que se encuentran de forma dispersa, y para lograr un nivel adecuado de información se deben consultar muchísimas fuentes.

Por el contrario, los fabricantes de calderas entregan muy poca información de las características de sus productos. Éstas tienen diferentes unidades de medida dependiendo del origen de fabricación, y por lo general entregan información sobre una eficiencia que es sólo referencial, niveles de potencia y presiones de trabajo nominales y dimensiones de las calderas. Es muy difícil encontrar información sobre el comportamiento típico de la operación, variaciones de la eficiencia, recomendaciones de instalación o mantenciones.

En cuanto al equipo de calentamiento inductivo, al ser un método relativamente nuevo, la información técnica es poca y se encuentra dispersa. Las pocas empresas fabricantes de estos equipos califican la información técnica como reservada. Sin embargo, a modo general los equipos se describen como compactos, con una temperatura de fácil control ante condiciones relativamente estables (sin grandes perturbaciones), y con gran eficiencia en la conversión de energía [35] [82] . Información adicional se puede encontrar en los diversos Informes Técnicos [3] [4] [47] [48] [49] [68] del proyecto Fondef D05I-10098 “Mejoramiento de Operaciones de Biolixiviación de Minerales de Cobre y Electro-Obtención en Plantas a Gran Altura Mediante Calentamiento de Soluciones por Inducción Magnética”, redactados durante la ejecución del proyecto.

En el tema de comparación de equipos de calentamiento, actualmente no existe una metodología propuesta o información detallada que facilite la comparación entre diversas alternativas. Cuando se requiere de una comparación, ésta se realiza en el contexto de reemplazo de un equipo defectuoso o de mal funcionamiento por otro de una tecnología diferente, o bien, más eficiente. Los cálculos son particulares y para aplicaciones muy específicas[15] [62] [73] .

La comparación económica de los sistemas de calentamiento de fluidos propuesta en este trabajo tiene un símil a las recomendaciones hechas por el Programa País Eficiencia Energética [50] . En ella, se denomina “Total Cost Ownership” al criterio de comparación que define al costo como criterio de comparación, el cual consiste en tomar en cuenta todos los costos que implicará una alternativa, tomando en cuenta tanto los de inversión, operación y mantención durante la vida útil del equipo. Está enfocada como una guía rápida de comparación para todo tipo de público en la compra de equipos eficientes frente a equipos no eficientes, como refrigeradores o ampolletas. Sin embargo, esta metodología es muy simplificada y no toma en consideración tasas de descuento, variaciones de los precios de los energéticos ni diferentes horizontes de evaluación.

## **1.4 Objetivos y Metodología**

A continuación se describen los objetivos generales y específicos del presente trabajo de tesis, junto con la metodología de trabajo.

### **1.4.1 Objetivos generales**

- Analizar las principales características técnicas de los sistemas de calentamiento de fluidos, con equipos resistivos, calderas diésel e inductivo y que actualmente se encuentren disponibles en el mercado.
- Realizar una comparación técnica de las características de los sistemas de calentamiento mencionados anteriormente.
- Realizar una comparación económica de los sistemas antes mencionados, que tome en consideración costos de inversión y costos de operación.
- Determinar ventajas y desventajas de los sistemas de calentamiento de fluidos de pasada de tipo inductivo, resistivos y calderas diésel, estableciendo bajo qué condiciones un sistema resulta superior a los otros.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Proponer una metodología de comparación entre los sistemas de calentamiento estudiados que considere las principales características técnicas y económicas.
- Estudiar las temperaturas máximas y los puntos calientes que se producen en los sistemas resistivos de calentamiento de fluidos.
- Determinar la curva de eficiencia teórica de las calderas de combustión en función de la altura de instalación.
- Desarrollar un caso de estudio que permita comparar las características de los tres sistemas de calentamiento.
- Realizar un detallado estudio de costos de equipos de calentamiento de fluidos y equipos anexos.
- Establecer estimaciones de precios de los energéticos a 20 años en base a estudios realizados por organismos especializados.

### 1.4.3 Metodología de trabajo

La metodología a seguir en la presente tesis consta de las siguientes etapas.

- Revisión bibliográfica del estado del arte sobre los sistemas de calentamiento de fluidos con equipos resistivos, calderas diésel e inductivos.
- Determinación de la metodología de comparación de los sistemas de calentamiento a través de resistencias eléctricas, de inducción magnética y calderas diésel.
- Comparación técnica general de los sistemas de calentamiento en base a la metodología de comparación propuesta en la etapa anterior.
- Diseño de un caso de estudio de calentamiento de agua de pasada de 29[l/s] dentro de una tubería de acero, de 15[cm] de diámetro interno, con una temperatura de entrada de 10°C. La tubería se encuentra en una faena minera a 5000 m.s.n.m. El flujo de agua se calentará con cada uno de los sistemas estudiados en dos niveles de potencia: 500[kW] y 1[MW].
- Análisis de costos detallados de equipos de calentamiento y equipos auxiliares empleados en los tres sistemas bajo estudio.
- Estimación de precios de la energía eléctrica y del diésel a 20 años en base a estudios de CNE y ENAP.

- Exhaustivo análisis comparativo técnico y económico en base al caso de estudio, considerando costos de inversión y operación anual de cada sistema. Se analizarán los costos actualizados en un período de evaluación de 5, 10 y 20 años. Los costos de energía se supondrán en primer lugar constantes en el horizonte de evaluación, y luego variables según estimaciones de los precios a 20 años con el objetivo de analizar las posibles ventajas económicas en función de los precios de los energéticos.

## 1.5 Resultados Obtenidos

Los resultados encontrados tuvieron como base una propuesta metodológica de comparación de los sistemas de calentamiento, la cual se presenta a continuación en detalle:

### 1.5.1 Metodología de comparación de sistemas de calentamiento

El siguiente listado tiene como propósito enumerar los aspectos más relevantes a considerar en una comparación técnico-económica de sistemas de calentamiento y que fueron los que se utilizaron en este estudio. Se espera que en un estudio cualquiera al menos la mayoría de los puntos sean considerados. Los aspectos a considerar en la comparación técnica-económica son las siguientes.

- a) Características del fluido:
  - i. Temperatura inicial. Distribución de la temperatura final.
  - ii. Flujo [m<sup>3</sup>/h] en régimen permanente.
  - iii. Naturaleza del fluido (calor específico, conductividad térmica, densidad, viscosidad dinámica) en función de la temperatura.
- b) Consideraciones de operación:
  - i. Ciclo de Trabajo del proceso de calentamiento.
  - ii. Precisión de la temperatura requerida.
- c) Consideraciones técnicas de los sistemas:
  - i. Potencia nominal del equipo de calentamiento
  - ii. Densidad de potencia [W/cm<sup>2</sup>]
  - iii. Rendimiento energético global del sistema (traducido también a costos).
  - iv. Existencia de puntos calientes, temperaturas máximas y mínimas en el equipo.
  - v. Capacidad de automatización (facilidad de controlar la temperatura).
  - vi. Necesidad de fluidos auxiliares: enfriamiento de bobinas, intercambiadores de calor, bombas de recirculación, estanques, etc.
  - vii. Vida útil de los equipos.

- viii. Pérdidas de flujo calor en las tuberías de transporte de fluido [W/m].
- d) Entorno y ambiente:
  - i. Tamaño de la tecnología y requerimientos de espacio para instalación.
  - ii. Contaminación, ya sea atmosférica, de red, acústica u otras.
  - iii. Efectos del entorno sobre el sistema: Altura en m.s.n.m, presión atmosférica, temperatura ambiente.
  - iv. Capacidad de acceso a la energía (eléctrica o térmica).
  - v. Confiabilidad de la tecnología, fallas típicas.
- e) Costos:
  - i. Inversión.
    - Equipo de calentamiento.
    - Equipos anexos necesarios.
    - Salas para instalación.
  - ii. Operación (costo anual).
    - Energía, tanto eléctrica, gas y/o petróleo.
    - Mantenimiento.
    - Personal de operación y/o supervisión

### **1.5.2 Resultados obtenidos en base a la comparación**

Las principales conclusiones que se obtienen de la comparación técnica y económica es que el sistema de calentamiento en base a inducción magnética tiene las ventajas de ser muy compacto, con una elevada densidad de potencia, posee respuestas mucho más rápidas y precisas en el control de la temperatura del fluido, su diseño permite adaptarse a sistemas instalados previamente sin cambiar las presiones hidráulicas internas de las tuberías, y además es posible aplicarlo a todo tipo de fluidos sólo con pequeñas modificaciones del suscepto. Su eficiencia es mayor si se considera que los equipos alternativos requieren de elementos anexos que poseen pérdidas de calor, como intercambiadores de calor, bombas de recirculación o estanques de acumulación. Además, requiere de una mínima mantención en comparación a los sistemas alternativos y no requiere de ningún tipo de operador. Sin embargo, su costo de inversión es elevadísimo en comparación con los sistemas alternativos (del orden de 4 veces). El análisis de los costos de inversión y operación mostró que el sistema de calentamiento inductivo es conveniente económicamente en aplicaciones en donde se requiere de

redundancia de equipos por motivos de disponibilidad en procesos que no pueden interrumpirse (procesos críticos), como por ejemplo procesos de la gran minería de cobre, debido a la gran confiabilidad que éste posee.

Esto causa que pierda ventajas en aplicaciones donde las características antes mencionadas no son tan importantes, y el sistema más conveniente pasa a ser el resistivo para niveles de potencia bajos y medianos.

## **1.6 Estructura de la Tesis**

Luego de la introducción del Capítulo 1, en el Capítulo 2 se describe las características de los sistemas de calentamiento resistivo. Se describen en detalle los elementos tubulares de calentamiento (materiales, dimensiones y densidad de potencia), que son las unidades básicas que conforman todos los calentadores de inmersión. Luego se describen los calentadores con flange, los cuales se componen de un conjunto de elementos tubulares de calentamiento unidos a un flange de acero, utilizados en calentamiento en estanques y calentadores de circulación. A continuación se describen los equipos de control típicos, la eficiencia de los calentadores resistivos, su vida útil, costos y disponibilidad de los mismos.

El Capítulo 3 se centra en los aspectos más importantes del diseño y operación de las calderas. Además, se describe las características de eficiencia, detallando las pérdidas que posee en particular una caldera de agua caliente, equipos de control, costos y fallas típicas.

En el Capítulo 4 se realiza un detallado estudio de las características del sistema de calentamiento inductivo, sus principales componentes (sistema eléctrico, bobina inductora y susceptor). Luego se hace mención a estudios de contaminación por campos electromagnéticos en el ambiente, detalla su eficiencia, equipo de control, su disponibilidad y los costos asociados al sistema.

El Capítulo 5 muestra el estudio comparativo técnico-económico de los sistemas de calentamiento presentados anteriormente, tomando en cuenta los aspectos descritos en la metodología de comparación propuesta. Se realiza el estudio para sistemas configurados sin y con criterio de seguridad  $n-1$ , analizando los costos totales en horizontes de 5, 10 y 20 años, con costos de los energéticos fijos y estimados en el mediano plazo.

Finalmente el Capítulo 6 entrega las conclusiones finales del estudio comparativo, proponiendo estudios futuros que no fueron considerados en este trabajo.

## Capítulo 2

# Sistema de Calentamiento Resistivo

Los sistemas eléctricos para calentamiento han sido utilizados desde fines del siglo XIX, con el primer uso comercial del arco eléctrico [10] . Desde entonces se ha desarrollado toda una industria de elementos y técnicas diferentes para el uso de la energía eléctrica como fuente de calor. Esta técnica de calentamiento está basada en el efecto Joule, donde el calor es generado debido a la circulación de corriente por un material conductor. De manera simple, el flujo de calor generado es igual a  $I^2R$ , con  $I$  la magnitud de la corriente eléctrica y  $R$  la resistencia eléctrica del material.

Los campos de aplicación en que se utilizan los sistemas de calentamiento con resistencias son aquellos donde la temperatura de operación es como máximo hasta los 1200°C [7] . Así, se destaca su uso en la industria metalúrgica, de cerámicos, vidrios, plásticos y alimenticia.

El calentamiento de fluidos está clasificado como un Calentamiento Resistivo Indirecto [12] donde el calor es generado en un material diferente al fluido –resistencias eléctricas–, el cual es trasferido al fluido mediante fenómenos de conducción, convección y radiación. Los sistemas que se describen a continuación se caracterizan por sumergir la resistencia eléctrica en el fluido a calentar, y son llamados comúnmente en la industria como Calentadores de Inmersión (Immersion Heaters). La unidad básica que los conforman son los Calentadores Tubulares de Inmersión –descritos en detalle en este estudio–, los que se agrupan para formar sistemas de mayor potencia, como son los calentadores con Flange y de Circulación.

## 2.1 Calentadores Resistivos Tubulares de Inmersión

### 2.1.1 Descripción general

Estos elementos son utilizados para el calentamiento de fluidos, desde aceites hasta agua, ácidos, productos alimenticios y gases.

Su diseño fundamental consiste en un conductor eléctrico, rodeado por una capa de material eléctricamente aislante y revestidos con una envoltura metálica para contener a toda la unidad como un único sólido [18]. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 1.

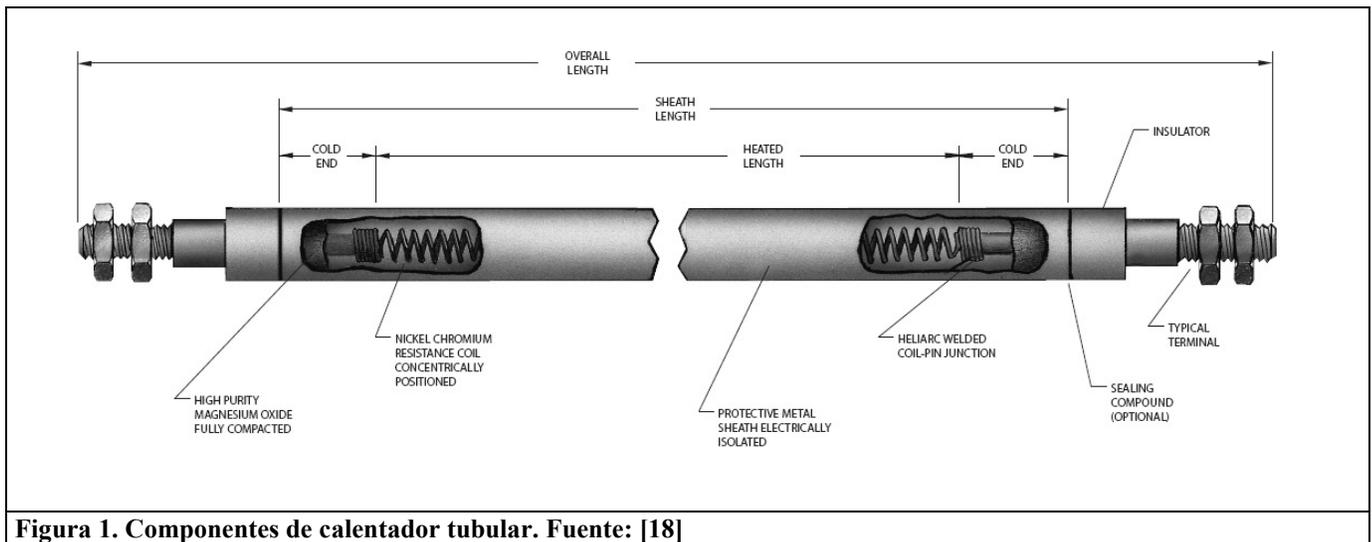


Figura 1. Componentes de calentador tubular. Fuente: [18]

Esta configuración es la utilizada por la mayoría de las industrias fabricantes de resistencias eléctricas de inmersión, existiendo pequeñas variaciones y mejoras por parte de empresas especializadas.

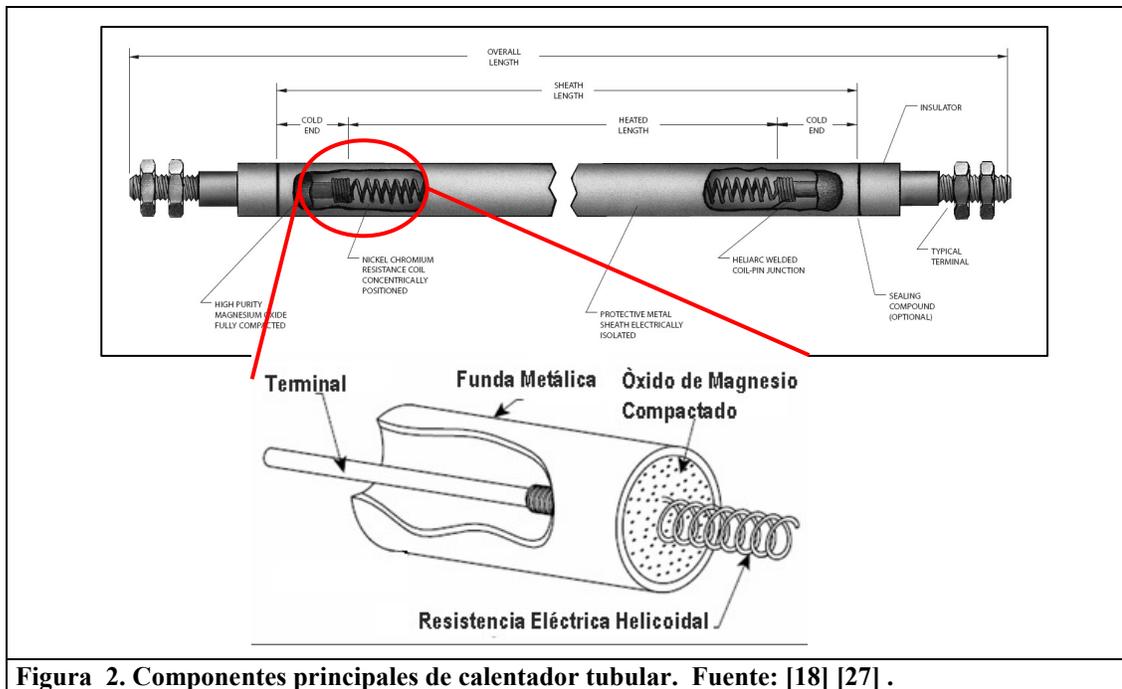
El calor es generado por efecto Joule en el conductor eléctrico interno (de material Nichrome o similares), el cual tiene un elevado valor de resistividad eléctrica. El calor es transferido desde el conductor eléctrico hacia la funda metálica a través de conducción y luego hacia el fluido por medio de convección. En ciertos casos la transferencia de calor también se realiza por radiación desde el conductor hacia el fluido (en especial en aplicaciones de calentamiento de fluidos dentro de estanques).

En la mayoría de los diseños el aislante utilizado es polvo de óxido de magnesio compactado de alta pureza, el cual tiene una alta resistencia eléctrica y una buena conductividad térmica. Este último factor es muy importante, ya que el calor debe ser transferido desde el conductor eléctrico hacia la

funda metálica a través del aislante eléctrico, por lo que una buena conductividad térmica asegura una rápida dinámica en la transferencia de calor desde el elemento tubular hacia el fluido.

La funda metálica o envoltura es la encargada de transferir el calor al fluido. La elección del material de la funda es importante ya que su comportamiento térmico define de gran manera el comportamiento que tendrán los materiales internos y la dinámica de la transferencia de calor. La mayor restricción en casi todos los casos es la capacidad de los materiales para resistir la corrosión. La funda puede ser de cobre, aleaciones de níquel y hierro, o acero inoxidable. Para calentar agua se utiliza típicamente cobre (ya que es relativamente barato y posee una elevada conductividad térmica), pero se recomienda utilizar una aleación de níquel-cromo-hierro dada su alta capacidad de resistencia a la corrosión, lo que entrega mayor vida útil. Esto se debe a que en ambientes ricos en oxígeno, en la funda de aleación se forma una capa la cual protege al material de mayor corrosión y es estable incluso cuando el elemento es sometido a variaciones cíclicas de temperatura [12] . Al estar en contacto directo con el fluido, la funda metálica típicamente se aterriza eléctricamente para evitar conducción de corriente por el fluido.

En la Figura 2 se muestra en detalle los elementos mencionados que constituyen un calentador tubular de inmersión.



**Figura 2. Componentes principales de calentador tubular. Fuente: [18] [27] .**

Los calentadores tubulares de inmersión se utilizan para una amplia gama de niveles de potencia y tensión que cubren la mayoría de los requerimientos industriales. Comúnmente se pueden

encontrar para aplicaciones de potencia desde 160 [W] hasta 22 [kW], y tensiones desde los 120[Vac] a los 600[Vac]. Sin embargo los fabricantes tienen la capacidad de realizar calentadores tubulares acorde con los requerimientos del comprador, es decir, con mayor potencia o para tensiones mayores.

Este calentador tubular es la unidad básica para formar calentadores de inmersión de mayor potencia. Los calentadores tubulares se les dan diferentes formas (arqueado) y se agrupan para formar unidades mayores, como son los calentadores con flange o brida (Flange Heaters) y los de circulación. Los fabricantes trabajan formas estándar de calentadores tubulares, aunque es posible diseñar formas especiales para una determinada aplicación. La Figura 3 muestra diferentes configuraciones para un calentador tubular.



### 2.1.2 Dimensiones

Las dimensiones de los calentadores tubulares que se encuentran disponibles son estándar, sin embargo se pueden modificar si la aplicación lo requiere. El diámetro externo típico va desde los 2,8[mm] hasta los 16[mm], y se pueden encontrar con un largo desde los 40[cm] hasta 8[m]. Las dimensiones del conductor eléctrico interno varían según las especificaciones, sin embargo, el diámetro se rige por la numeración AWG. Van desde los 36 AWG a los 15 AWG. La funda metálica tiene un grosor estándar de 0,89[mm] el cual se puede aumentar por requerimientos de robustez a 1,24[mm] o a 1,65[mm] ([18] [21] [23] ).

### 2.1.3 Densidad de potencia

La densidad de potencia se refiere a la cantidad de calor en Watts que el calentador es capaz de entregar, dividido por la superficie total del mismo. En general, un material viscoso con baja conductividad térmica requiere de una baja densidad de potencia para aumentar su temperatura de manera uniforme. Las altas densidades de potencia se utilizan para calentar líquidos menos densos y con materiales de alta conductividad térmica como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Densidades de potencia recomendados para diferentes materiales a calentar. Ref: [11] .**

Material a calentar	Temperatura deseada (desde 0°C) [°C]	Densidad de potencia típica [W/cm <sup>2</sup> ]
<b>Agua</b>	100	8
<b>Soda Cáustica</b>	82	4
<b>Gasolina</b>	71	1,5
<b>Sales de Baño</b>	430-500	5
<b>Metal Fundido</b>	250-500	4
<b>Aceite vegetal</b>	200	6
<b>Parafina</b>	65-70	2

La densidad de potencia en un calentador tubular determina el gradiente de temperatura entre la funda y la resistencia eléctrica interna. La temperatura de la funda aumentará hasta que el calor producido sea igual al calor transferido, es decir, aumentará hasta que se encuentre en un proceso en régimen permanente. Si hay un pobre mecanismo de transmisión de calor desde la funda hacia el fluido, la funda podría alcanzar temperaturas bastante elevadas, pudiendo calcinarse, carbonizarse o alterar sus características químicas debido a un sobrecalentamiento. Además, un nivel excesivamente alto de la temperatura de la funda aumentaría la temperatura de la resistencia eléctrica interna, lo que posibilita una falla o daño en la misma resistencia o en la aislación eléctrica.

En particular, el agua es un fluido poco viscoso con una baja conductividad térmica, y que además posee una elevada capacidad para mantener o conservar el calor. Es por ello que se recomienda utilizar bajas densidades de potencia para el calentamiento de agua con estos elementos (máximo 10-12[W/cm<sup>2</sup>]). El utilizar una mayor densidad de potencia, produciría un calentamiento excesivo de la funda metálica debido a la mala conductividad térmica del agua [12] .

## 2.1.4 Materiales típicamente usados en la fabricación de calentadores tubulares

A continuación se presentan los materiales más usados en la configuración de un elemento tubular.

### - Conductor eléctrico

El material más usado para el elemento eléctrico es Nichrome o también llamado Ni20Cr80 por su composición química. Se compone principalmente de Níquel en un 80% y Cromo en un 20%. Este material es usado debido su alto punto de fusión, su alta resistencia eléctrica, buena resistencia a la oxidación, ausencia de elementos volátiles y baja expansión térmica, entre otras. En la Tabla 2 se muestra las características del Nichrome y del Cobre para efectos de comparación.

**Tabla 2. Propiedades físicas y eléctricas del Nichrome y cobre.**

Propiedad	Goodfellow Nichrome® [22]	Cobre recocido [61]	Unidades
Densidad	8,4	8,96	g/cm <sup>3</sup> @20°C
Resistencia a tracción	650-1100	210	MPa
Resistividad eléctrica	108	1,7	μΩ-cm
Punto de fusión	1400	1083,4	°C
Coefficiente de expansión térmica lineal	14	16,4	μm/m-°C @ 20°-100°C
Conductividad térmica	13,4	385	W/m-°K
Calor específico	0,45	0,385	kJ/kg-°K
Coef. de variación de resistividad eléctrica por temperatura	0,00005	0,00382	1/°K

De la tabla anterior cabe destacar la baja variación de la resistividad eléctrica debido a la temperatura (coeficiente de variación de resistividad) que caracteriza al Nichrome.

Según los datos entregados por lo fabricantes del material [22] la variación es muy pequeña, sin embargo comparable en términos absolutos con la variación de la resistividad del cobre. Se sabe que la resistividad eléctrica puede ser expresada como una función lineal dependiente de la temperatura, que en el caso del Nichrome es:

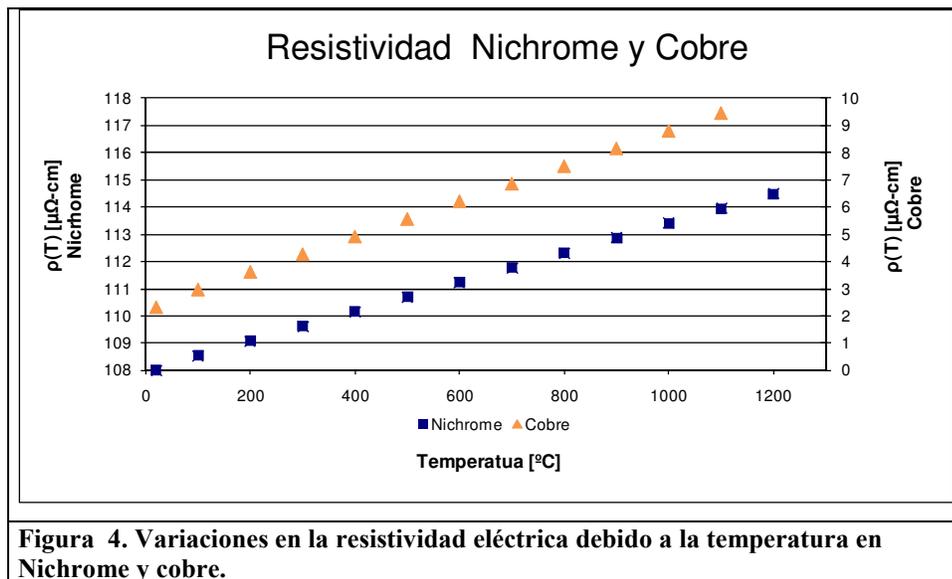
$$\rho(T) = \rho_o(1 + \alpha(T - T_o)) \quad (1)$$

$$\rho(T) = 108 \cdot (1 + 0,00005 \cdot (T - 20)) \quad (2)$$

Y en el caso del cobre es:

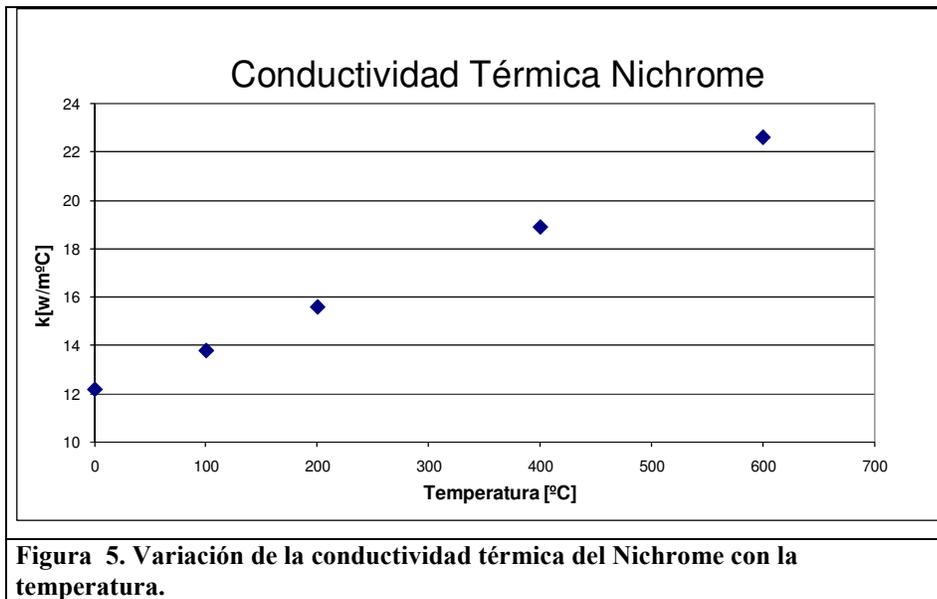
$$\rho(T) = 1,7 \cdot (1 + 0,00382 \cdot (T - 20)) \quad (3)$$

A continuación en la Figura 4 se muestra la resistividad del Nichrome en función de la temperatura (eje izquierdo), y para efectos de comparación se muestra también la variación de la resistividad del Cobre (eje derecho).



El calor específico del Nichrome también se comporta de manera casi constante con la temperatura. Se aconseja tomar el valor 0,45 [kJ/kg°K] como valor medio entre 0[°C] y 1000[°C].

El valor de la conductividad térmica crece al aumentar la temperatura en el Nichrome, que según autores [8] , varía con la recta  $k(T) = 0.0173 \cdot T + 12.122$  [W/m °K] (ver Figura 5).



En general, los elementos Ni-Cr no son recomendables para temperaturas de operación mayores a 1150°C dado que la tasa de oxidación es muy grande y la temperatura es muy cercana a la temperatura de fusión [36] . Para aplicaciones en resistencias al aire, se recomienda incluso no sobrepasar los 800°C.

- **Aislación eléctrica**

Para la aislación eléctrica entre el conductor eléctrico y la funda metálica, es universalmente usado el polvo de óxido de magnesio (MgO) el cual tiene una alta resistencia eléctrica y una conductividad térmica mayor a 3,4 [W/m °K]. Se utiliza en una composición de alta pureza (98-99%) y gran compactación para mejorar las capacidades de conducción de calor. A continuación en la Tabla 3 se muestra las propiedades del material.

**Tabla 3. Propiedades físicas y eléctricas del MgO. (Ref: [26] [75] [76] )**

Propiedades	MgO (99.3% pureza)	Unidades
Densidad	3,55 – 3,68	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a Tracción	95,8	GPa
Resistividad Eléctrica	2,3 – 5,9	10 <sup>9</sup> Ωcm @700°C
Temperatura de Fusión	2800	°C
Coefficiente de expansión térmica lineal	13,0	μm/m-°C @ 20°-1000°C
Conductividad Térmica	6 - 40	W/m-°C
Calor Especifico	0,92 – 1,27	kJ/kg-°K

Las variaciones de la resistividad eléctrica, la conductividad eléctrica y el calor específico se obtienen de tablas que entregan los fabricantes. De estas tablas, se construyen polinomios que permiten conocer los valores a diferentes temperaturas con mediana precisión (coeficiente de correlación R<sup>2</sup>>0,985). La conductividad térmica se puede describir entre 0° y 1800°C a través del polinomio:

$$k(T) = 3,807935 \cdot 10^{-14} T^5 - 1,778106 \cdot 10^{-10} T^4 + 2,85259 \cdot 10^{-7} T^3 - 1,53752 \cdot 10^{-4} T^2 - 2,707885 \cdot 10^{-2} T + 40,95303 \quad (4)$$

cuyo valor de R<sup>2</sup> es 0,9899. El calor específico entre 25° y 3300°C se aproxima por el siguiente polinomio:

$$Cp(T) = -4,044979 \cdot 10^{-14} T^4 + 3,178854 \cdot 10^{-9} T^3 - 8,560859 \cdot 10^{-7} T^2 + 1,003465 \cdot 10^{-3} T + 0,9051191 \quad (5)$$

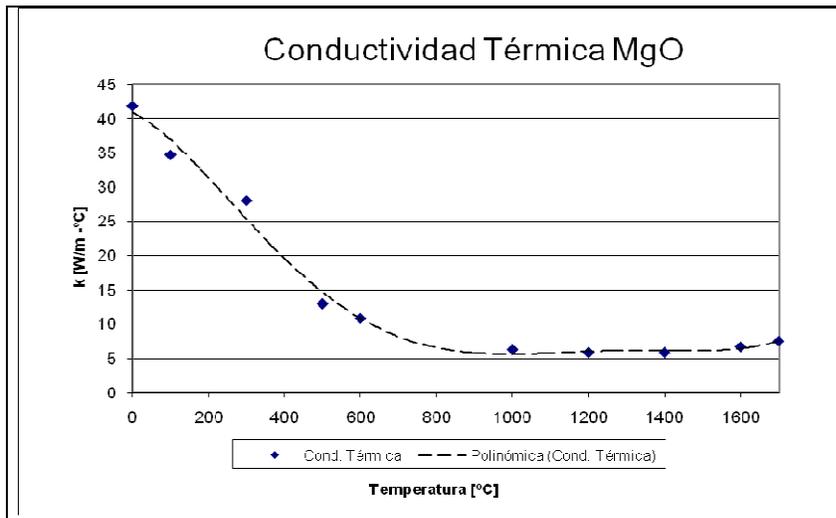
cuyo valor de R<sup>2</sup> es 0,9945.

La resistividad eléctrica entre 600° y 1000°C sigue la relación dada por el siguiente polinomio:

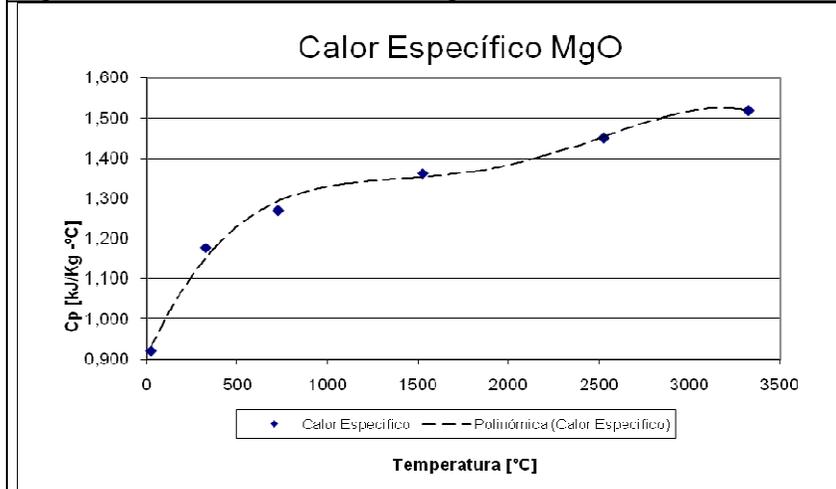
$$\rho(T) = 8 \cdot 10^{12} e^{-0,0231 \cdot T} \quad (6)$$

cuyo valor de R<sup>2</sup> es 0,9876.

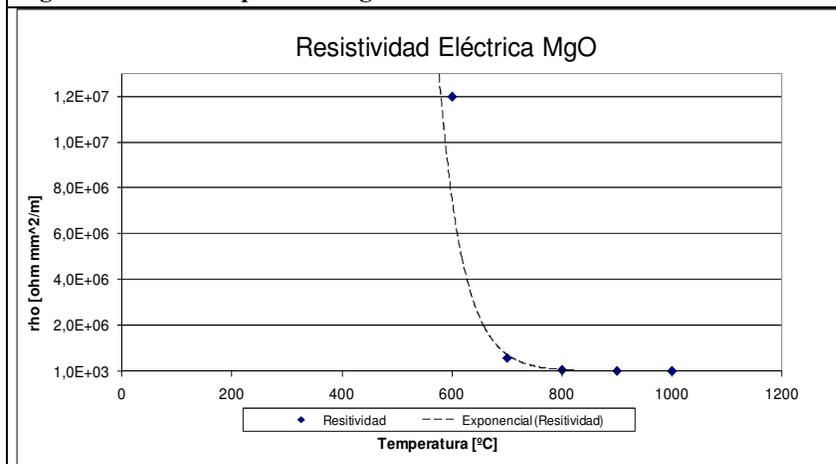
Las variaciones de los parámetros con la temperatura se aprecian en los gráficos de la Figura 6.a, 6.b y 6.c.



**Figura 6.a. Conductividad térmica MgO.**



**Figura 6.b. Calor específico MgO.**



**Figura 6.c. Resistividad eléctrica MgO.**

- **Funda metálica**

La elección del material de la funda es importante por los aumentos de temperatura en el interior del elemento tubular. El cobre es un elemento que se utiliza generalmente para calentar agua sin elementos corrosivos. Para fluidos corrosivos, ácidos, gases o aceites se utilizan aleaciones de Níquel-Cromo-Fierro, como el Incoloy®, el cual tiene una mayor resistencia a la oxidación y a la corrosión. El contenido de níquel de la aleación permite brindarle una resistencia mayor a la corrosión que otros materiales, especialmente a la causada por iones cloruros y a la corrosión bajo tensión. A altas temperaturas, el contenido significativo de cromo provee resistencia a ambientes oxidantes, y la combinación de níquel, hierro y cromo brinda una buena resistencia a la rotura.

Para soluciones químicas, también es posible utilizar fundas de Acero Inoxidable SS-304 y SS-316. En la Tabla 4 se muestra las propiedades físicas del Incoloy, del Cobre, y de los aceros 304 y 316 para efectos de comparación.

**Tabla 4. Propiedades físicas y eléctricas del Incoloy, cobre y acero 304 y 316. (Ref:[28] [61] )**

Propiedades	Incoloy®	cobre recocido	acero 304	acero 316	Unidades
Densidad	7,94	8,96	8,00	8,00	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a Tracción	664-771	210	505	580	MPa
Resistividad Eléctrica	98,9	1,7	72	74	μΩ-cm @20°C
Temperatura de Fusión	1357-1385	1083,4	1400- 1455	1370- 1400	°C
Coefficiente de expansión térmica lineal	14,4	16,4	17,3	16	μm/m-°C @ 20°-100°C
Conductividad Térmica	12	385	16,2	16,3	W/m-°K
Calor Específico	0,460	0,385	0,500	0,500	kJ/kg-°K
Coef. de variación de resistividad eléctrica por temperatura	0,000306	0,00382	0,00636	0,00636	1/°K

Se recomienda usar Incoloy para obtener una vida útil mayor en una aplicación de calentamiento de agua.

El calor específico del Incoloy es constante entre los 0 y 1000°C según varios autores [8] . La resistividad eléctrica se puede describir entre 0° y 1000°C a través del polinomio:

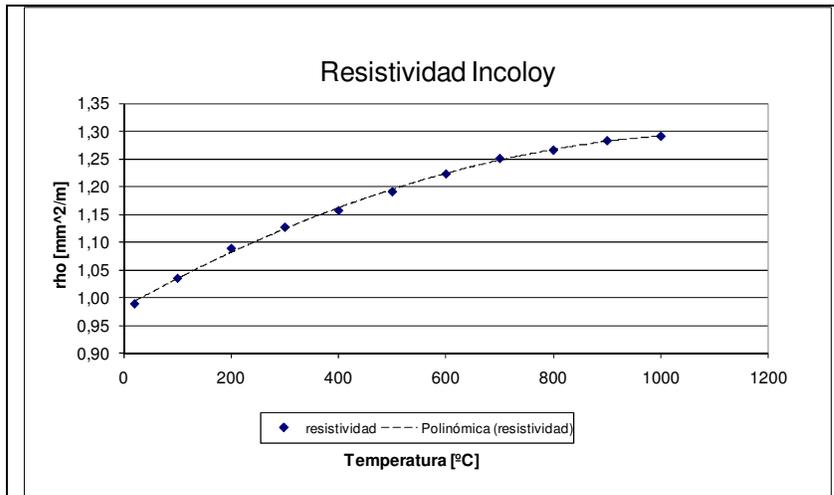
$$\rho(T) = -2,328596 \cdot 10^{-7} T^2 + 5,419402 \cdot 10^{-4} T + 0,982463 \quad (7)$$

cuyo valor de R<sup>2</sup> es 0,9987. La conductividad térmica varía entre 20° y 1000°C según:

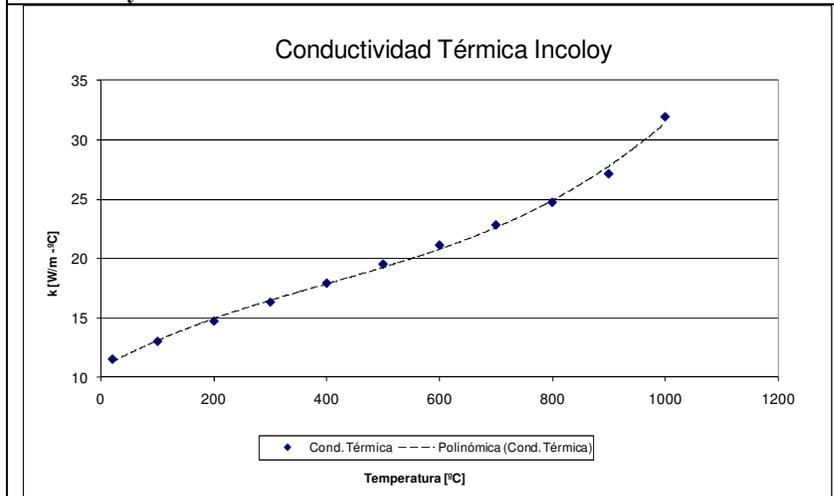
$$k(T) = 2,528528 \cdot 10^{-7} T^3 - 3,051495 \cdot 10^{-5} T^2 + 2,588388 \cdot 10^{-2} T + 10,784324 \quad (8)$$

cuyo valor de  $R^2$  es 0,9973.

Las variaciones de los parámetros con la temperatura se aprecian en los gráficos de la Figura 7.a y 7.b, junto con su aproximación polinomial:



**Figura 7.a. Variación con la temperatura de la resistividad eléctrica y del Incoloy.**



**Figura 7.b. Variación con la temperatura de la conductividad térmica del Incoloy.**

## 2.2 Calentadores Resistivos con Flange (o Brida)

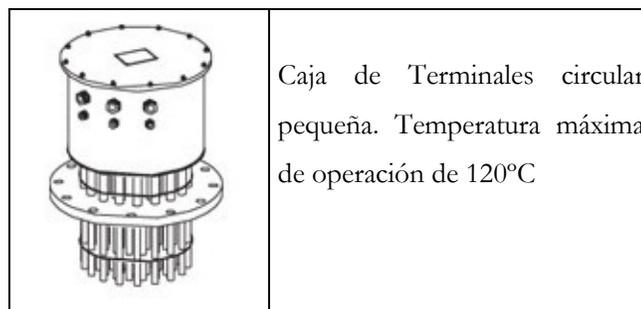
### 2.2.1 Descripción general

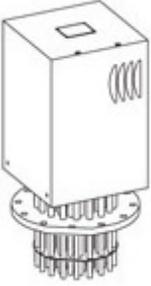
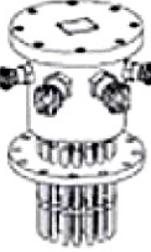
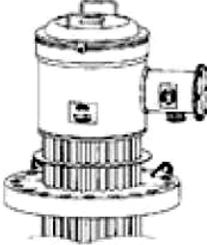
Los calentadores con flange son usados comúnmente para calentar gases o líquidos en tanques o recipientes en serie. Éstos son fáciles de instalar y de mantener. Están formados por un grupo de elementos tubulares con forma de “U” unidos a un disco metálico (flange) mediante soldadura o atornillados, tal como se aprecia en la Figura 8.



Son ideales cuando se requiere entregar una gran potencia al fluido. Una de las ventajas de este tipo de calentador, es que es posible añadir fácilmente un termostato para el control de temperatura.

Debido a la gran cantidad de tubos que lo conforman, los contactos y la caja de terminales (bornera) deben estar diseñados para evitar cortocircuitos, sobrecalentamiento o explosiones en el caso de que el calentador se encuentre en un ambiente peligroso o explosivo. Están normados según la aplicación y el nivel de seguridad que se requiere por los estándares NEMA, UL, IEC, VDE y TÜV. Estas normas recomiendan dimensiones especiales para cierto nivel de seguridad y materiales a utilizar, entre otros aspectos. Los fabricantes construyen la bornera según las necesidades de la aplicación, tal como se observa en la Figura 9.

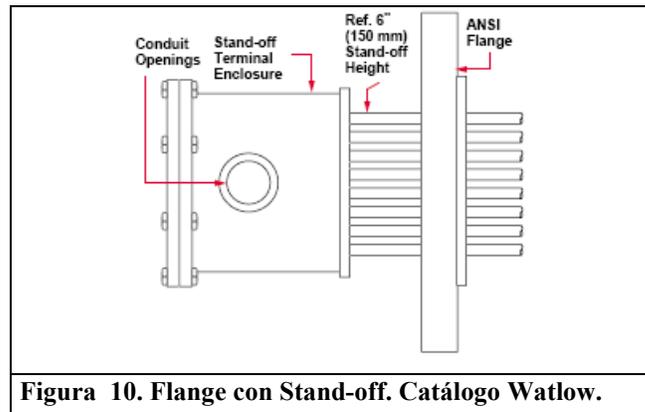


	<p>Caja de Terminales cuadrada con sistema de ventilación.</p>
	<p>Caja de Terminales para atmósferas explosivas/peligrosas. Múltiples conexiones.</p>
	<p>Caja de Terminales para atmósferas explosivas/peligrosas. Conexión única.</p>
<p><b>Figura 9. Diferentes tipos de caja de conexiones.</b>  <b>Fuente: Catálogo Cetel.</b></p>	

Los flanges son fabricados bajo normas de calidad y la mayor parte de las empresas estadounidenses se rigen por el estándar ASME B16.5-2009 “Pipe Flanges and Flanged Fittings”, el cual describe las diversas formas de flanges, dando dimensiones y tolerancias de presión. También se refiere a las dimensiones de los distintos tipos de caras o uniones y a los materiales y dimensiones de los diversos tipos de empaquetaduras. En los países europeos los flanges imperantes son los métricos, actualmente conocidos como flanges PN, y tradicionalmente conocidos como flanges con estándar DIN. Las normas DIN son múltiples para diferentes para cada tipo de flange (acero, aleaciones, soldados, atornillados, etc) y presión nominal.

Los elementos tubulares que conforman el flange pueden estar completamente sumergidos en el fluido, o pueden estar ubicados una distancia fuera del fluido que sirve de protección para los bornes, ya que constituye una barrera de aire que aísla el calor que emiten los elementos. Este tipo de

construcción se le conoce como “stand off” (Figura 10). Por lo general los fabricantes sugieren al comprador una distancia de “stand-off” en base a las condiciones de operación del calentador. Son recomendadas para aplicaciones donde la temperatura excede los 205°C.



**Figura 10. Flange con Stand-off. Catálogo Watlow.**

Las potencias que entregan estos calentadores es elevada, desde los 3[kW] hasta 670[kW] en diseños estándar, pudiendo llegar a 1[MW] con un diseño especial. La densidad de potencia también varía desde los 2[W/cm<sup>2</sup>] a los 12[W/cm<sup>2</sup>]. Las conexiones pueden ser monofásicas o trifásicas.

### 2.2.2 Dimensiones

Las dimensiones de los flanges van desde 3[in] (7,6[cm]) a 14[in] (35,5[cm]) de diámetro estándar, de Clase ANSI 150 (valores de presión máximas de trabajo). Las dimensiones de estos elementos varían según la aplicación. En la Figura 11 se muestra un calentador con flange de 1[MW] de potencia, con un largo aproximado de 3[m].



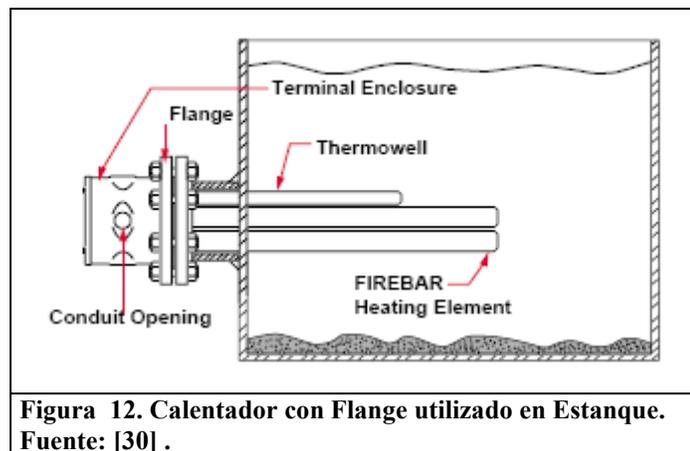
**Figura 11. Calentador con Flange de 1[MW]. Empresa Amarc, Italia.**

A continuación se describirán las dimensiones específicas para aplicaciones en estanques y calentadores de circulación.

## 2.3 Calentadores Resistivos con Flange en Aplicaciones en Estanques

### 2.3.1 Descripción general

La mayoría de las aplicaciones de los calentadores resistivos con flange son para ser utilizadas en estanques contenedores de fluidos. Es la solución típica para calentar grandes volúmenes de fluido tal como se observa en la Figura 12, ya que éstos pueden ser instalados en paralelo en un mismo estanque. Son fáciles de reemplazar y mantener, ya que basta con vaciar el estanque para manipularlos.



**Figura 12. Calentador con Flange utilizado en Estanque. Fuente: [30] .**

### 2.3.2 Dimensiones

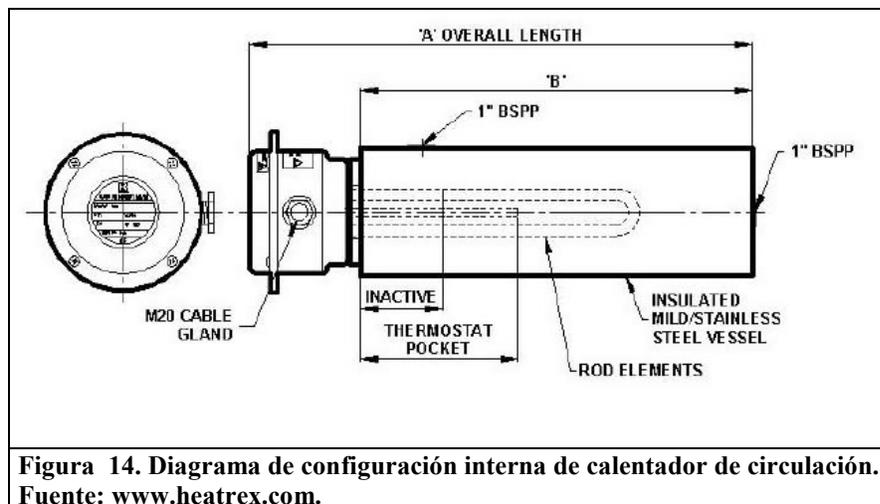
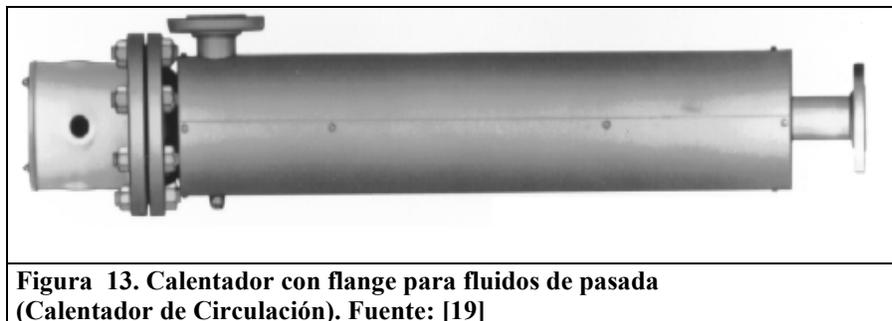
Las dimensiones de los calentadores con flange tienen como característica un tamaño de flange y el largo de los calentadores tubulares que lo conforman. Al ser un conjunto compacto de muchos elementos tubulares, para grandes potencias la longitud de los calentadores con flange es menor en comparación a un elemento tubular. Van desde los 35[cm] a 3,5[m] de largo. El diámetro del flange va desde los 7,6[cm] a 35,5 [cm] de tamaño estándar, sin olvidar que éstos se pueden modificar según la aplicación.

## 2.4 Calentadores Resistivos con Flange en Aplicaciones de Flujo de Pasada (Calentadores de Circulación)

### 2.4.1 Descripción general

Los calentadores resistivos con flange también son utilizados para el calentamiento de fluidos de pasada, los que comúnmente son llamados Calentadores de Circulación. Esta aplicación está pensada para bajas potencias, o para fluidos que logran aumentar su temperatura en una distancia reducida, la cual es la longitud del calentador. Este aumento de la temperatura depende de la viscosidad y de la conductividad térmica del fluido. Si el fluido tiene una alta viscosidad y alta conductividad térmica, el aumento de temperatura se logra en una corta distancia. En particular, el agua es un fluido poco viscoso, y con una conductividad térmica baja, por lo que este tipo de soluciones deben ser utilizadas en bajas velocidades de flujo.

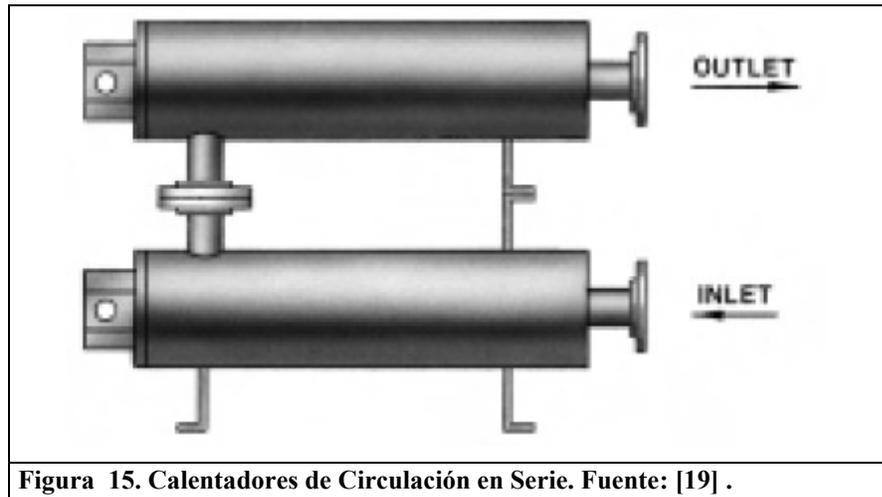
Las Figura 13 y Figura 14 muestran como es la configuración física de este tipo de calentadores.



Todas estas aplicaciones requieren que el fluido entre o salga en un ángulo recto. En el caso de calentamiento de fluidos de alta densidad, como líquidos o aceites, esta condición restringe la

cantidad de flujo de pasada debido al aumento de las presiones hidráulicas internas generadas por los codos de la tubería.

Los calentadores de circulación pueden ser instalados en cascada o en paralelo para aplicaciones especiales como se muestra en la Figura 15. Además, los fabricantes entregan estas configuraciones instaladas con sus gabinetes de control en proyectos tipo “llave en mano”.



**Figura 15. Calentadores de Circulación en Serie. Fuente: [19] .**

Las potencias de estos calentadores de circulación dependen del fluido que se quiere calentar. Para agua limpia, las potencias van desde los 3[kW] hasta los 670[kW]. Para otros fluidos, como aceite, las potencias llegan a los 250[kW], y para gases llegan sólo a los 80[kW].

### 2.4.2 Dimensiones

Las dimensiones de los calentadores de circulación son dependientes del calentador con flange detallados en la sección anterior. La característica más importante es que éstos pueden ser instalados en serie o paralelo, y por lo tanto al considerar un espacio para su instalación debe tenerse en cuenta espacios para la mantención y posible reparación de un conjunto de calentadores de circulación. Se recomienda la instalación de este equipo en un área igual al doble del largo mayor del calentador para permitir remover e inspeccionar con facilidad los tubos calentadores.

## 2.5 Equipos de Control de Sistemas de Calentamiento Resistivo

A continuación se describen los equipos de control típicamente utilizados en los sistemas de calentamiento resistivo, sin entrar en detalle sobre las técnicas de control utilizadas.

El control básico de los equipos de calentamiento resistivo es el de temperatura del fluido mediante el control de la potencia de entrada al equipo. La potencia de entrada se manipula a través de contactores mecánicos o electrónicos, y/o a través de tiristores controlados (SCR). La problemática principal es el aumento de la resistencia de los materiales cuando la temperatura de los elementos tubulares aumenta. Si se tiene una tensión fija que alimenta a la resistencia, el aumento de la resistencia produce que la potencia que se entrega al fluido disminuya de forma inversamente proporcional al aumento de la resistencia, por ello la importancia de una buena elección de material conductor, como el Nichrome, el cual minimiza esta dificultad.

Las soluciones de control van desde un encendido y apagado del equipo completo, múltiples etapas donde se tienen distintos niveles de potencia, hasta un control fino continuo de la potencia a través de tiristores, asegurando una alimentación con una fuente variable de tensión.

En el mercado existen gabinetes de control estándar, los cuales incorporan fusibles de protección, transformadores, y están diseñados para una potencia requerida. Estos gabinetes se diseñan para corrientes de hasta 4000 [A] y 600[V] [30] . Los diseños más básicos de gabinetes aceptan montajes de controles remotos, además de estar diseñados para diferentes ambientes (húmedos, explosivos o con polvo).

A continuación se muestran ejemplos típicos de la configuración del control de potencia usados en estos equipos [20] .

### 2.5.1 Control de una fase

Consiste en un contactor mecánico (o electrónico) trifásico o monofásico, un transformador y fusibles. El control de potencia es del tipo on/off. La potencia de este gabinete está restringida a la capacidad de corte del contactor. El esquema básico se aprecia en la Figura 16.

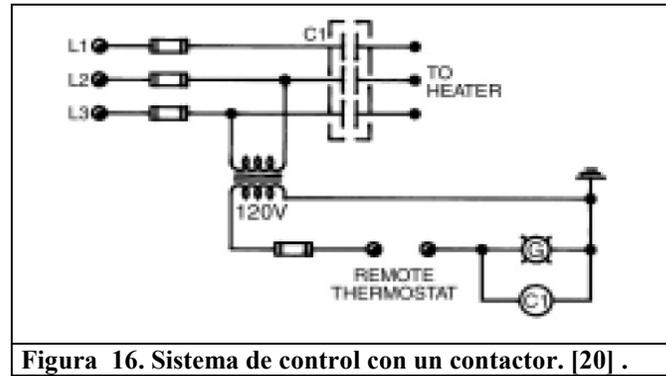
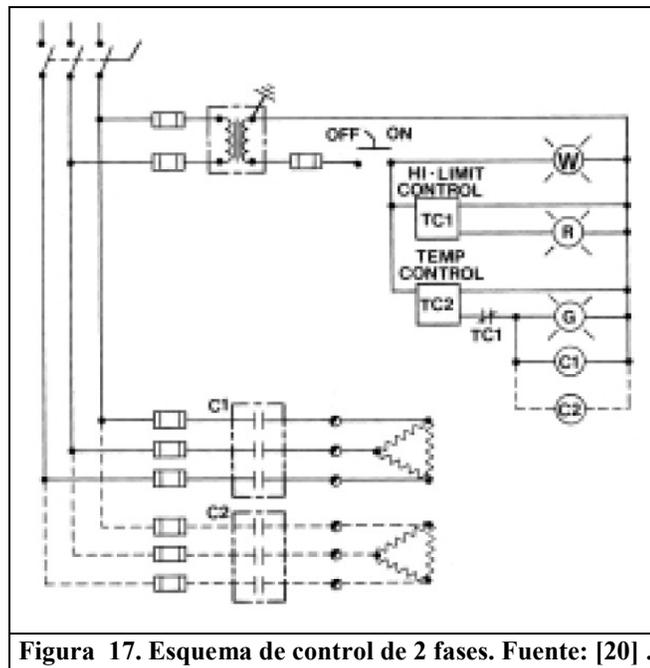


Figura 16. Sistema de control con un contactor. [20] .

### 2.5.2 Control de dos a cuatro fases

La principal característica de este tipo de gabinete es la capacidad de controlar la potencia del equipo a través de escalones, otorgando un poco más de controlabilidad al equipo. Para una unidad de 2 fases, se tendrá la posibilidad de obtener 0, 50 ó 100% de la potencia nominal. Para 4 fases, se logra controlar 0, 25, 50, 75 y 100% de la potencia nominal.

Al igual que en caso anterior, el nivel de potencia que se logra controlar depende de la capacidad de corte de los contactores. Su esquema básico se muestra en la Figura 17.



### 2.5.3 Control de una a doce fases

Si se requiere de un control más fino de la potencia, se deben colocar más etapas con contactores. En el mercado se encuentra disponible una solución estándar de hasta 12 etapas. Dada la restricción que tienen los contactores, mientras más etapas se tengan, se puede obtener un mejor control y aplicarla a mayores niveles de potencia. Sin embargo, al tener muchos contactores, la operación de ellos no es por igual. Algunos se utilizan más que otros (generalmente los dispuestos en las últimas fases de control), por lo que algunos tendrían una vida útil menor, lo que se traduce en un reemplazo de contactores defectuosos en corto tiempo. El esquema de control se muestra en la Figura 18.

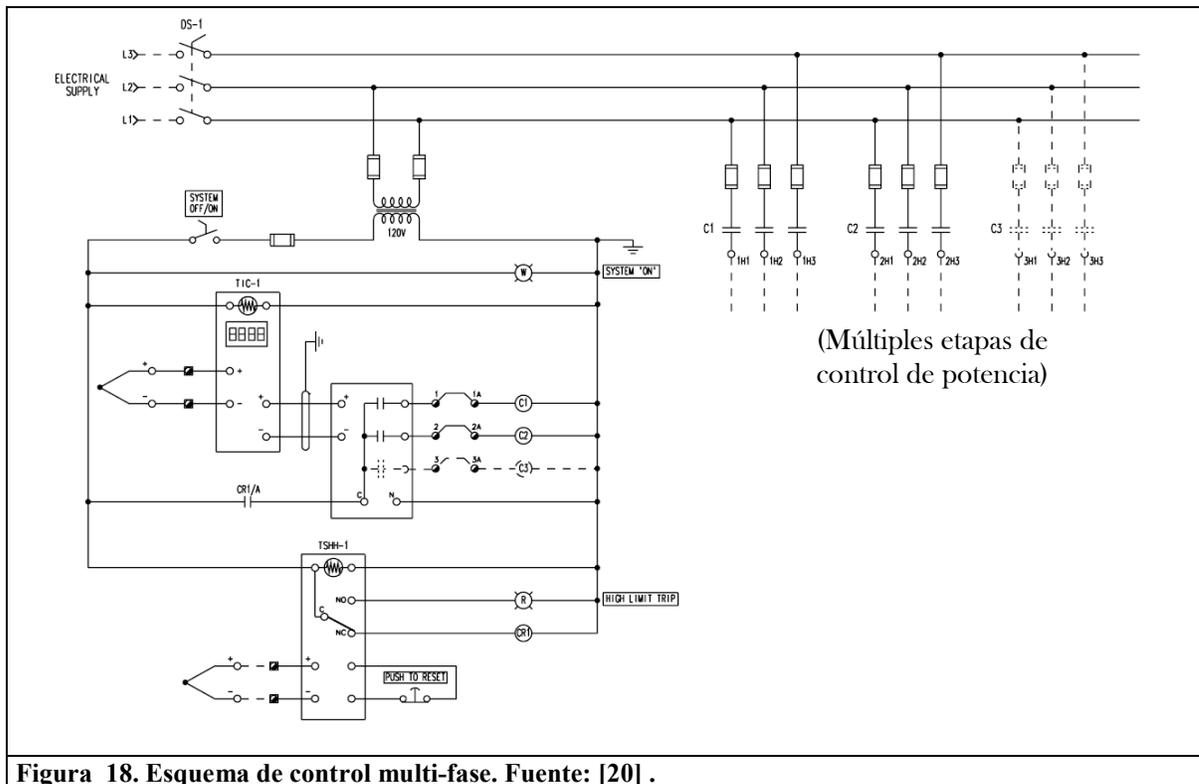


Figura 18. Esquema de control multi-fase. Fuente: [20] .

#### - La problemática de los contactores mecánicos

Los contactores mecánicos se han usado desde años para controlar la potencia de los calentadores resistivos. Esto debido a que no existía una electrónica de potencia para los niveles que se utilizan hoy en día. El contactor mecánico tiene una serie de problemas que se deben tomar en cuenta cuando se utilizan. Entre ellos, la corta vida útil si se les utiliza para controlar potencia. Los fabricantes aseguran que la vida útil de un contactor es de un millón de acciones (operaciones de apertura y cierre). Si además se considera que tienen un mínimo tiempo de acción, que generalmente es de 15 segundos, la vida útil del contactor es de 180 días aproximadamente (operando de forma continua durante esos 180 días)[20] [70] .

Otro de los posibles problemas es que el contactor puede abrir o cerrar en cualquier punto de una senoide. Si la acción no ocurre cuando la senoide pasa por cero, se provoca un arco que se debe extinguir (Figura 19). Este arco produce ruido de radiofrecuencia que interfiere con los equipos de medición, computadores u otros componentes electrónicos que se encuentre en la vecindad.

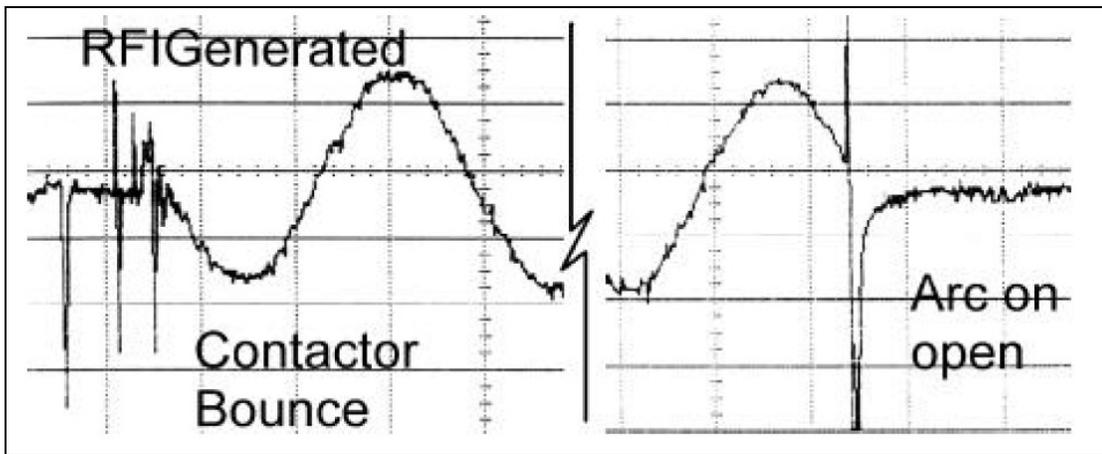


Figura 19. RFI generado en el accionamiento de un contactor mecánico. Referencia [70]

Además, hay que agregar al problema anterior la posibilidad de que el contactor no responda a la señal de abrir o cerrar, provocando problemas en la estrategia de control. Sin embargo, la utilización de estos elementos sigue siendo masiva dado que la técnica de acción ha sido depurada, minimizando las problemáticas de arco y radio interferencia. Además son elementos económicos en comparación a relés electrónicos.

#### 2.5.4 Rectificadores controlados de silicio (SCR, Silicon Controlled Rectifiers)

Este elemento es un rectificador semiconductor en el cual es posible controlar su modo de conducción y bloqueo a través de una señal de compuerta. Su diagrama básico es el mostrado en la Figura 20.

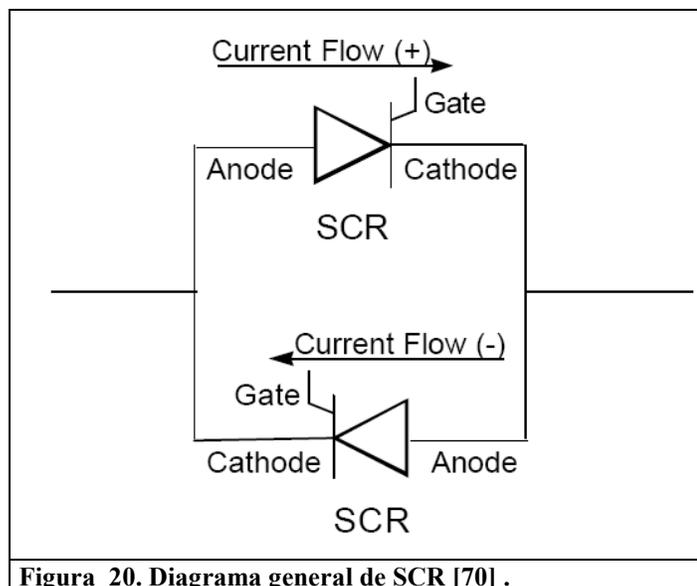


Figura 20. Diagrama general de SCR [70].

La configuración antiparalela permite un traspaso máximo de potencia a la carga.

Las formas de controlar el disparo de un SCR se pueden agrupar en dos:

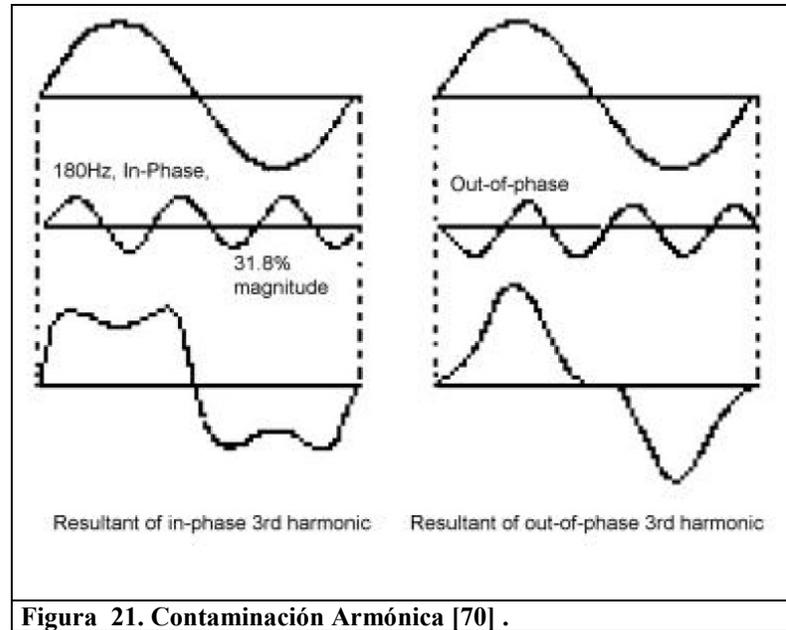
- **Disparo de cruce por cero**

Este tipo de disparo hace que la acción de conducir o bloquear del SCR se realice sólo cuando la sinusoide de tensión pase por cero. Esto tiene una serie de ventajas en comparación al contactor mecánico:

1. Reduce los costos de operación y mantención al no haber elementos mecánicos que reparar.
2. Los disparos del SCR no producen ruido de radio frecuencia.
3. Se logra un control más fino, ya que las acciones son posibles de realizar a mayor frecuencia.
4. El control más fino evita grandes expansiones o contracciones del tubo calentador resistivo, lo que aumenta su vida útil.

- **Disparo por ángulo de fase**

Esta técnica divide cada ciclo de la sinusoide en pequeñas unidades, permitiendo un disparo en ciertos ángulos, resultando un control mucho más preciso. Sin embargo, presenta ciertas desventajas. Dado que puede actuar en cualquier parte de la sinusoide, la acción puede provocar un impulso de voltaje que produce ruido de radiofrecuencia, lo que hace necesario colocar protecciones electromagnéticas a los elementos electrónicos que circundan al SCR. Además, este tipo de disparo baja el factor de potencia del equipo, lo que puede ser un elemento importante a considerar. También se producen armónicas en la red (Figura 21). Esta contaminación es perjudicial, ya que producen peaks en las mediciones de requerimiento de potencia de la compañía suministradora de electricidad, las cuales pueden ser falsas dada la contaminación de la red.



**Figura 21. Contaminación Armónica [70].**

### 2.5.5 Control mixto con contactores y SRC

En el mercado también existe la posibilidad de controlar los elementos resistivos a través de una mezcla entre contactores mecánicos y tiristores. Su configuración tiene una serie de etapas controladas por contactores, los cuales dan un control grueso de la potencia, y la última etapa controlada por un SCR, el cual otorga un control fino, generalmente del 20 al 30% de la potencia. Esta solución es relativamente económica y tiene un mejor desempeño que los sistemas anteriormente expuestos. Los contactores no están en permanente acción, aumentando su vida útil, y el SCR da un control de potencia más preciso. Su configuración básica se muestra en la Figura 22.

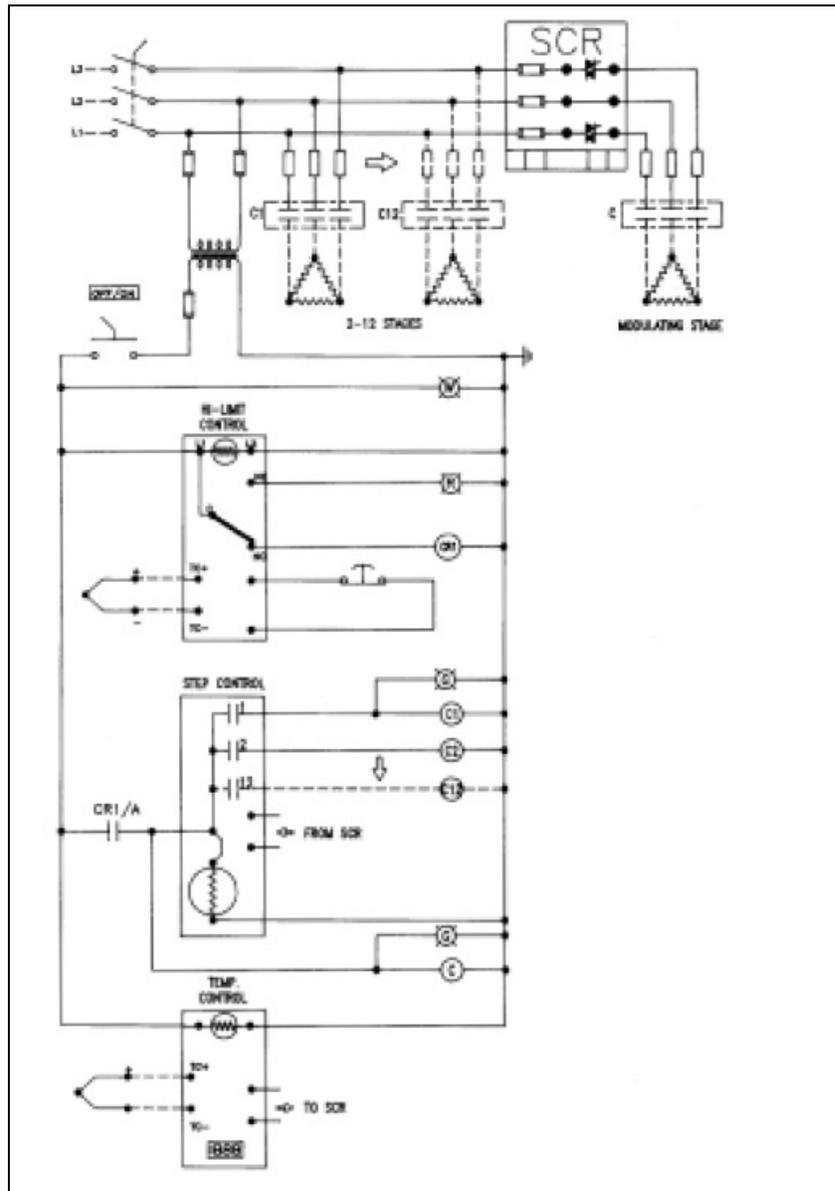
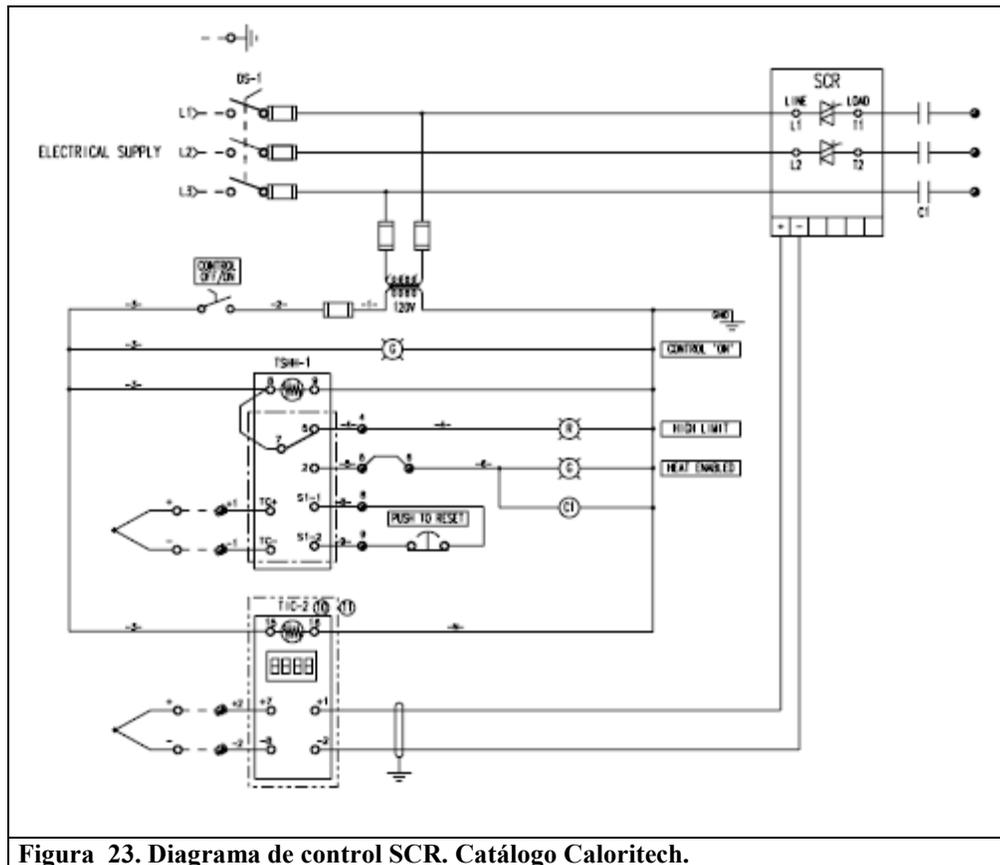


Figura 22. Diagrama de control mixto contactores y SCR. Fuente: [20] .

## 2.5.6 Control con SCR

Finalmente, existe la solución utilizando sólo SCR. Este permite controlar todo el rango de potencia (restringido a la capacidad del SCR). Aquí sólo existen contactores de respaldo ante fallas o sobrecargas, como protección al tiristor (Figura 23). El nivel de potencia manejable depende de la capacidad del SCR. Típicamente se encuentran hasta una carga de 650[A], 600[V].



**Figura 23. Diagrama de control SCR. Catálogo Caloritech.**

Respecto al control por contactores mecánicos, los tiristores presentan las siguientes características [9] :

- No se justifica su uso para control en 2 o 4 etapas por el mayor costo que éstos tienen.
- Deben resolverse los problemas de refrigeración (por aire o agua) de los tiristores dentro de los gabinetes de control.
- Se puede controlar fácilmente la potencia demandada.
- Es necesario verificar el nivel de armónicos inyectados a la red producto de su uso.

## **2.6 Eficiencia de los Calentadores Resistivos de Inmersión**

La eficiencia global de los equipos resistivos de calentamiento en general es elevada (sobre el 95% [7] [19] [21] [29]). Las pérdidas están focalizadas principalmente en los contactos eléctricos. En el caso de calentadores con flange, existen pérdidas por las paredes del estanque adicionales, que sin embargo pueden minimizarse con aislaciones adecuadas.

## **2.7 Vida Útil de los Calentadores Resistivos de Inmersión**

La vida útil de los calentadores de inmersión es afectada por numerosas variables, tales como:

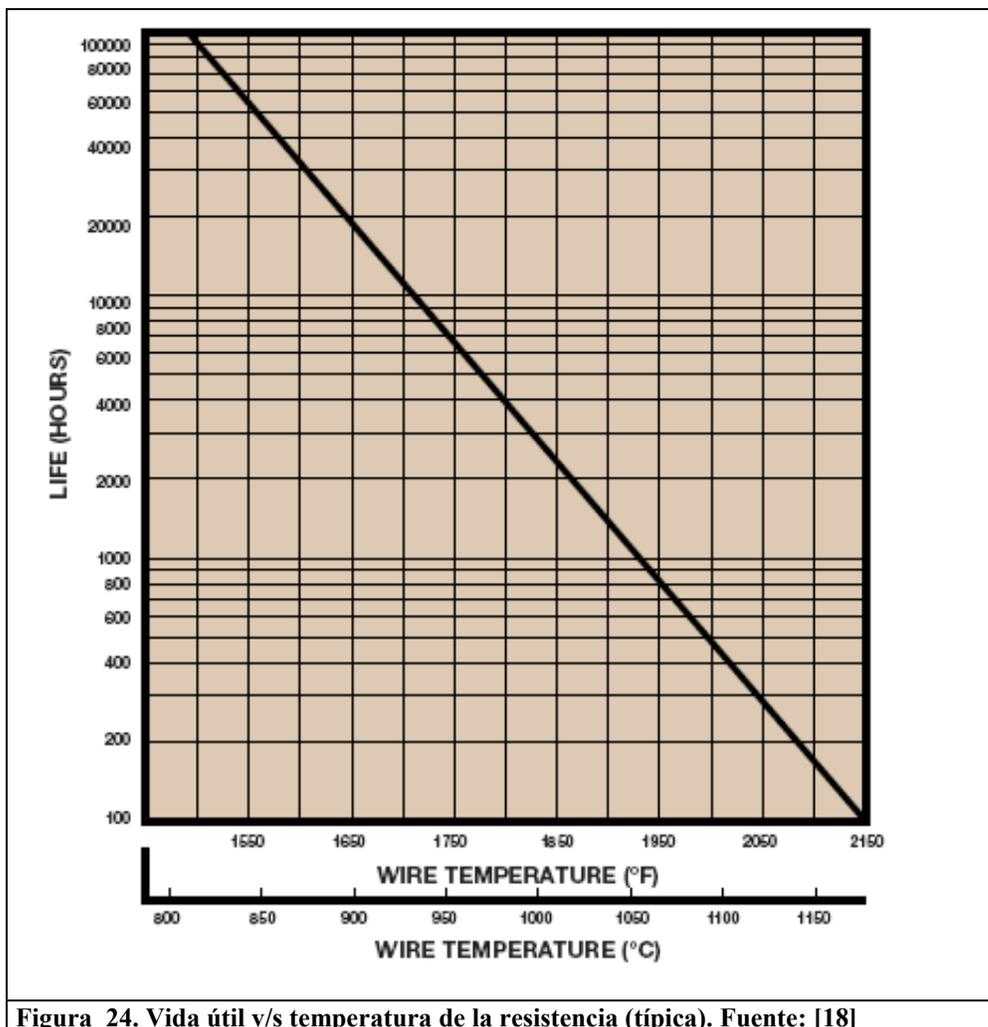
- La densidad de potencia
- La temperatura de la funda
- El Ciclo de trabajo

La densidad de potencia afecta la vida útil del calentador debido a que si éste posee una alta densidad de potencia pero una mala transferencia de calor desde la funda hacia el fluido, se produce un aumento de la temperatura de la funda. Al aumentar la temperatura de la funda, las temperaturas internas del elemento tubular también aumentan, afectando al conductor eléctrico interno, el cual se puede fundir o dañar prematuramente. El aumento de temperatura de la funda también produce una aceleración en el proceso de oxidación de la funda.

El ciclo de trabajo afecta las propiedades mecánicas de los materiales del calentador. En el proceso de encendido y apagado, los materiales se expanden y contraen, produciendo pequeñas fisuras y fallas en el material, que pueden provocar cortocircuitos (por falla de la aislación eléctrica) o en el largo plazo un quiebre de los tubos.

Según la empresa Caloritech [18], para sus elementos tubulares calentadores, la esperanza de vida útil normal depende mayormente de la temperatura de operación del la resistencia eléctrica interna del tubo calentador, que a su vez es función de la temperatura de operación y de la potencia por unidad de largo del elemento.

A continuación en la Figura 24 se observa una gráfica de las horas típicas de duración del elemento en función de la temperatura de la resistencia.



Se puede de la Figura 24 que a 800°C son casi 13 años de vida útil asegurada (más de cien mil horas).

Típicamente en operación de calentamiento de agua u otros fluidos, hay formación de sarro o deposición de minerales sobre la funda. Este sarro no altera la conducción de calor hacia el fluido, sin embargo, funciona como una capa adicional de material produciendo una acumulación del calor entre la funda metálica y la capa de sarro. Esto hace que la temperatura de operación de la funda aumente, disminuyendo la vida útil del calentador resistivo. Los fabricantes recomiendan periódicamente hacer una inspección y retirar el sarro acumulado, ya sea con algún tratamiento químico, o mecánicamente (retirándolo o raspándolo con alguna herramienta). Para asegurar una larga vida útil, es recomendable utilizar materiales resistentes a la corrosión según la aplicación, y en el caso de calentamiento de agua, utilizar agua tratada que es menos agresiva para los materiales. La

última opción implica considerar un circuito cerrado de agua con intercambiadores de calor y bombas de recirculación que encarecen una inversión inicial en este tipo de tecnología.

Como se expuso anteriormente, la temperatura de operación modifica las propiedades de los materiales. En particular, existen estudios recientes acerca de los cambios provocados en el Incoloy producto de la operación continua del material para fundas metálicas en calentadores resistivos.

Uno de los estudios realizados [37] señala que en el material Incoloy 800, usado en una funda metálica de calentadores resistivos y sometido a una temperatura constante de 815°C durante 15 años, se producen precipitaciones en el material que provocan que la dureza y la fuerza sean aumentadas, y que la ductibilidad y fragilidad sean reducidas, como se observa en la Tabla 5. Estos datos se obtuvieron a través del estudio de un trozo de un tubo el cual estuvo en servicio por 15 años en un ambiente hidrogenado a 815°C.

**Tabla 5. Propiedades del Incoloy 800 envejecido [37] .**

<b>Propiedades Mecánicas del Incoloy 800</b>					
	Resistencia a la tracción [MPa]	Tensión de deformación [MPa]	Elongación [%]	Dureza [V]	Tenacidad [J]
<b>Incoloy 800</b>	521	212	42	138	175
<b>Incoloy 800 envejecido</b>	569	280	28.2	154	33.47

La resistencia a la tracción es la habilidad del metal de soportar que sea traccionado por fuerzas opuestas actuando en línea recta. Corresponde a la tensión máxima que puede resistir. La dureza es la propiedad del metal de resistir la penetración y desgaste por otro metal o material. La tenacidad es la capacidad de un material de resistir la fractura y además de resistir la falla luego que el daño ha comenzado. Los datos mostrados anteriormente concluyen que el material se vuelve menos maleable y rígido.

En el Anexo A se concluye que en la operación típica de los calentadores resistivos la temperatura de los elementos tubulares no alcanzan más allá de los 300°C, por lo que se espera que en una operación normal, no exista envejecimiento de la funda metálica para el caso del Incoloy.

## **2.8 Costos a Considerar en el Uso de un Sistema con Resistencias Eléctricas**

En la evaluación económica de un sistema con resistencias, el costo de inversión depende del tipo de calentador resistivo que se considere. Por lo general, los costos más importantes son los de inversión en el calentador en sí, y en operación son los costos la energía eléctrica requerida. Sin embargo, los sistemas de calentamientos con flange se utilizan en procesos con circuitos cerrados de agua, donde el agua es tratada para así minimizar su dureza. Esto implica considerar dentro de los costos de inversión y operación, elementos tales como bombas de recirculación, intercambiadores de calor, piping y válvulas necesarias, además del costo de la resistencia y de la energía eléctrica consumida tanto por las resistencias como por las bombas y tableros eléctricos.

Los costos de mantención de estos sistemas son reducidos, tema que se explica a continuación.

### **Mantenimiento**

En general la mantención de los equipos resistivos de calentamiento es mínima. Los fabricantes aconsejan revisar los tubos calentadores periódicamente para detectar posibles fallas, minerales depositados o cualquier otro elemento que produzca un aumento de temperatura indeseada en el equipo, o que pueda provocar alguna falla en éste.

Las resistencias eléctricas envejecen con el tiempo, lo cual es medible a través de la resistencia eléctrica en frío. Esto requiere de equipos precisos de medición y revisar las conexiones entre las resistencias (para considerar conexiones en serie o paralelo). La limpieza de los contactos mecánicos es importante en el mismo sentido. Se recomienda apretar por lo menos una vez al año todos los contactos eléctricos que posea el equipo o limpiar el óxido, ya que ambos producen puntos calientes que son causas de fallas en el largo plazo. También se debe verificar que no existan fugas, y en el caso de calentamiento de agua la caja de terminales no debe nunca contener humedad.

## **2.9 Disponibilidad de los Equipos y Fallas Típicas**

Están documentadas las fallas más comunes de los equipos resistivos. Entre ellas están:

- Falla de aislación MgO. El aislante eléctrico interno de los calentadores tubulares suele fallar al captar humedad desde el fluido a calentar. Esto se produce debido a malos sellos en la fabricación, o bien por pequeñas fisuras producidas por las expansiones y contracciones de los materiales causadas por el ciclo de trabajo. La falla provoca conducción en la funda metálica, lo que puede ser indeseable.

- Rotura de elemento tubular. Típicamente ocurre cuando el equipo se utiliza con ciclos de trabajo permanentes. Los encendidos y apagados de los calentadores provocan expansiones y contracciones de los elementos calientes, que en el mediano plazo producen pequeñas fisuras en los materiales. Esas fisuras pueden propagarse y terminar por romper los materiales. Para evitar este problema, se recomienda el control de potencia por tiristores y así evitar variaciones grandes de temperatura en los materiales.
- Falla del termostato/termocupla. Provoca que los sistemas de control, tanto de la temperatura del fluido como de los calentadores tubulares, fallen
- Bajo nivel de agua. Los calentadores tubulares siempre deben estar cubiertos de agua. Cuando el nivel baja por sobre éstos, la temperatura aumenta provocando el calcinamiento del tubo. Esto se evita colocando sensores de sobre-temperatura o de nivel de agua en el caso de calentamiento en estanques. Este efecto se puede apreciar en las simulaciones informadas en el Anexo A, donde el cambio de flujo en 10 veces, aumenta la temperatura de los elementos tubulares en un 360%.
- Aumento de T° por acumulación de sarro. La acumulación de sarro u otros elementos debido a la dureza de los fluidos a calentar, provocan que la temperatura interna de los elementos del tubo calentador aumente. La capa de sarro actúa como un elemento adicional en la transferencia del calor, aumentando la resistencia térmica del conjunto. Para evitar esto, se recomienda utilizar circuitos de agua tratada e intercambiadores de calor en las aplicaciones, o bien hacer mantenciones periódicas para minimizar el efecto de la acumulación de sarro. En aplicaciones de calentamiento de pasada, los elementos tubulares tienen una distribución de temperatura que aumenta a lo largo del elemento, por lo que el extremo final estará mucho más caliente que el comienzo. Esto provoca que la acumulación de sarro y la elevación de temperatura sea mayor, pudiendo provocar un círculo vicioso de elevación de temperatura.

La disponibilidad de los equipos es en general alta, sin embargo hay ocasiones particulares en donde existen fallas frecuentes. El caso típico de falla frecuente es la rotura del elemento tubular.

# Capítulo 3

## Sistema de Calentamiento con Calderas Diésel

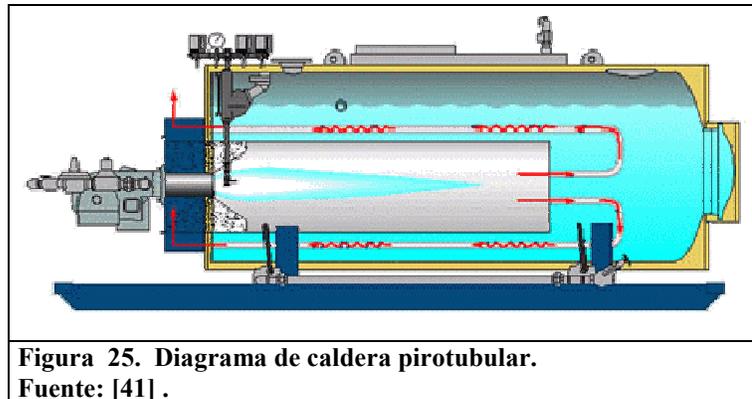
Los sistemas industriales de calentamiento de agua a través de calderas a base de combustibles fósiles han sido extensamente usados desde la época de la revolución industrial. Su uso principal es con el fin de generar vapor de agua y proveer de energía a procesos químicos, entre otros.

Al comienzo las calderas eran prácticamente espacios cerrados donde se calentaba el agua hasta obtener vapor. Luego, los diseñadores notaron que al aumentar la superficie de contacto entre el gas caliente y el agua se obtenía mayores cantidades de vapor, con una mayor eficiencia. Fue así como nació la idea de las calderas pirotubulares, donde el gas caliente que circula por tubos aumenta la temperatura del agua que los rodea. Los combustibles que se utilizan son gas natural, petróleo, diésel, carbón, madera y biomasa, entre otros.

A continuación se describen los sistemas de calentamiento de agua a través de calderas pirotubulares, con sus características más importantes.

### 3.1 Descripción general

En este tipo de calderas los gases calientes provenientes de la combustión en el hogar, circulan por el interior de tubos ubicados dentro de la caldera, los cuales son bañados por el agua a calentar. Luego del traspaso de calor, los gases son expulsados hacia el ambiente por una chimenea de succión. Un diagrama general se muestra en la Figura 25.



Este tipo de calderas tiene la ventaja de ser de diseño sencillo, posee flexibilidad en la operación ya que su gran estanque contenedor de agua permite absorber fluctuaciones de flujos de agua, y tienen una menor exigencia en el tratamiento del agua, ya que los depósitos formados en la operación son fácilmente removibles. Las desventajas que presentan son su gran tamaño en comparación a la misma capacidad de una caldera acuotubular, mayor tiempo para entrar en funcionamiento y no funcionan a altas presiones de trabajo.

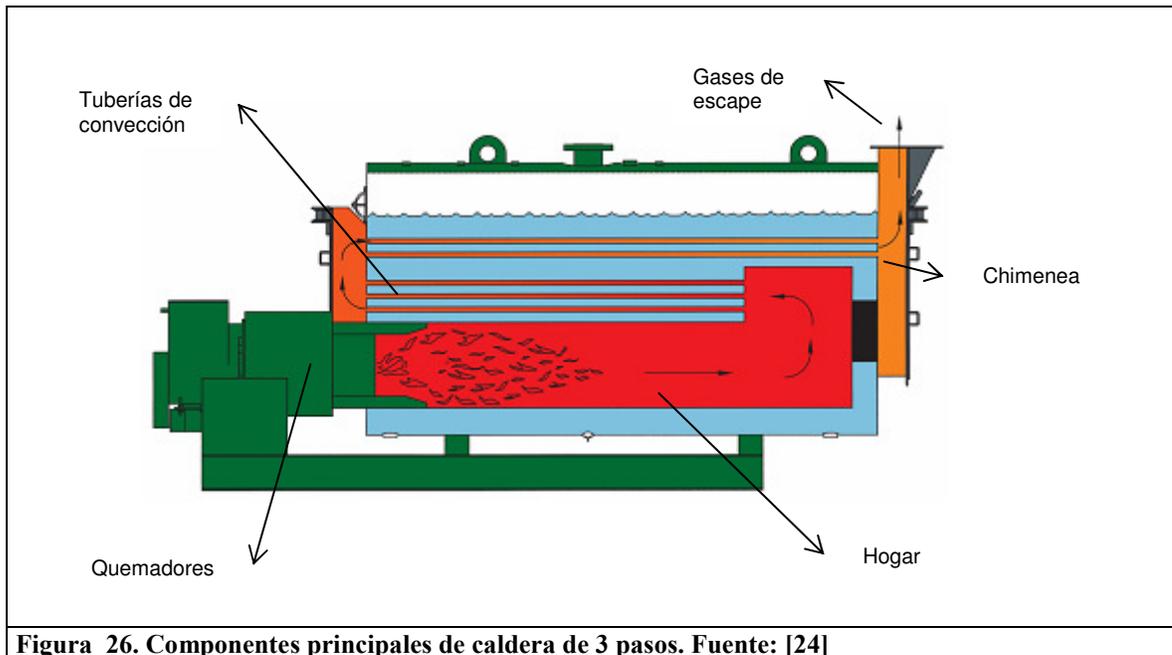
Una caldera de agua caliente consta de 2 sistemas principales: el sistema de combustión y el sistema de agua. A continuación se hace una descripción de ellas.

#### Sistema de Combustión

Consiste en inyectores de combustible, quemadores (o un fogonero para combustibles sólidos), sistema de aire, hogar, tubos de convección por donde circulan los gases calientes productos de la combustión y un tubo de succión para los gases de descarga (Figura 26).

Si bien los principios que se utilizan en el diseño de calderas de agua caliente son los mismos que se utilizan en calderas de vapor, las primeras son mucho más sencillas en diseño. Las calderas de vapor utilizan complejos sistemas de combustión consistentes en variados subsistemas para lograr

una mayor eficiencia en la caldera, como sistemas de precalentamiento de aire, economizadores y recalentadores, ente otros [56] .



**Figura 26. Componentes principales de caldera de 3 pasos. Fuente: [24]**

El combustible es inyectado a través de un sistema de quemadores, que para el caso de combustibles líquidos, se realiza de forma atomizada junto con aire dentro del hogar de la caldera, que luego es quemado formando gases de alta temperatura (en inglés: flue gases). La llama entrega calor por radiación a través de las paredes del hogar, y los gases de combustión salen de él a temperaturas entre 1000 y 1200°C dependiendo del combustible. En seguida, los gases pasan a los tubos por donde entregarán calor al fluido a través de convección. Las tuberías de convección pueden tener uno o varios pasos (etapa de la tubería donde los gases tienen un sentido a lo largo de la caldera), donde el gas entrega calor de forma progresiva al agua. Cuando los gases llegan a la tubería de escape (o chimenea de succión), la temperatura a la que salen al ambiente está entre los 110 a 230°C.

### **Sistema de Aire**

El oxígeno necesario para la combustión es tomado directamente del ambiente. En grandes calderas de vapor, existe todo un sistema para succionar el aire y calentarlo a través de ventiladores y calefactores, mejorando la eficiencia de la combustión.

En calderas de agua caliente, el aire de entrada se regula generalmente a través de válvulas y no es necesario un gran sistema de succión o calefacción.

## Dimensiones

Las calderas diésel se pueden encontrar en un intervalo muy amplio de potencia y dimensiones. Las calderas más pequeñas que se encuentran típicamente en el mercado bordean los 250kW de potencia, y las más grandes pueden llegar hasta los 50MW con sólo una unidad. A modo de referencia, en la Tabla 6 se muestran las dimensiones promedio para cada potencia

**Tabla 6. Dimensiones típicas de calderas diésel.  
Elaboración propia en base a diversas empresas.**

Potencia [kW]	largo [m]	alto [m]	ancho [m]
250-300	2,5	1,5	1,0
500	3,0	1,5	1,5
1000-1500	3,5	2,0	1,5
3000-4000	5,0	3,0	2,5
6000	6,0	4,0	3,0
10000	7,5	4,0	3,0

Las dimensiones varían dependiendo de la empresa fabricante, del modelo, de las condiciones de diseño (presión, temperaturas máximas), quemadores y exceso de aire, entre otros.

Al considerar las dimensiones de la caldera, hay que tomar en cuenta que se requiere de una sala especial para su instalación, con espacios de un 1[m] mínimo a cada lado de la caldera [64] , espacio para su mantención (sobre todo en la parte delantera donde se encuentran las puertas del hogar), además del espacio para los estanques de acumulación de diésel, válvulas, cañerías y tableros de control, que hacen que el espacio necesario para su instalación aumente considerablemente.

### 3.2 Aspectos Técnicos Importantes en el Diseño y Operación de Calderas

Las calderas de calentamiento, como tecnología madura, poseen una variedad de parámetros que permiten satisfacer las distintas necesidades que tiene un proceso en particular [73] . Para la evaluación, se requiere identificar al menos los aspectos que se listan a continuación. La selección de las características generalmente ocurre de manera iterativa, balanceando los costos de inversión, operación y mantenimiento para un cierto rendimiento de la caldera.

A continuación se presentan los aspectos más importantes:

**Combustible:**

El tipo de combustible a utilizar y sus poderes caloríficos permite determinar de manera aproximada el calor generado, así como también el nivel de emisiones. Para cada tipo de combustible existe una tecnología de combustión asociada y define el diseño de las superficies que transmitirán el calor al agua, como el tipo de material del hogar y las tuberías de convección, sus diámetros y la configuración espacial que tendrán. También de este punto depende fuertemente el sistema de control de emisiones que poseerá la caldera.

**Capacidad:**

La capacidad de generar calor de una caldera para calentamiento de agua es un factor importante, ya que determina el consumo de operación. En una caldera de vapor, la cantidad de vapor sobrecalentado es un valor importante a considerar, generalmente en [T/h] (toneladas por hora). En una caldera de agua caliente es la potencia, y por lo general se entrega un valor nominal en [kW], [BHP], [HP], o [MBH].

**Cantidad de Calderas:**

El número de calderas depende de los requerimientos de agua caliente. Para procesos donde se requiere de un flujo de agua continuo a una temperatura dada, una caldera puede ser suficiente, pero en el caso que se requiera un gran volumen de agua con variaciones de temperaturas, varias calderas tendrán un mejor comportamiento. También depende de la necesidad de una caldera de respaldo en caso de falla. Sin embargo, esto aumenta los costos operacionales y de mantención de las mismas.

**Presión de Trabajo:**

Este dato es importantísimo para el diseño y dimensionamiento de la caldera. En general, tiene una incidencia directa sobre los costos de fabricación.

**Rendimiento:**

Este parámetro, junto con las emisiones, condiciona al fabricante a diseñar un hogar de un tamaño adecuado, con condiciones para una buena combustión. Esto hace que el costo sea no mínimo en la fabricación.

### Altura y Clima:

La elevación sobre el nivel del mar incide directamente sobre la eficiencia de la combustión debido a la menor densidad de aire y presión atmosférica, reduciendo la combustión. Esta problemática se analiza en la sección "El problema de la combustión en gran altura". Las temperaturas ambientales mínimas y máximas, como también la humedad, también afectan la eficiencia de combustión.

En el caso de las calderas, para calentar un fluido de cualquier naturaleza se utiliza siempre un sistema con intercambiadores de calor para el traspaso de energía. Esto se debe a la complejidad para mantener el nivel de agua, la presión y la temperatura dentro de los márgenes de operación. Por ello se emplea un sistema cerrado de agua para tener mayor control sobre estas variables. Las restricciones recaen entonces en el diseño de los intercambiadores de calor y no en el diseño de las calderas. Al igual que los sistemas que utilizan resistencias eléctricas, los intercambiadores de calor ofrecen diseños para casi cualquier tipo de fluido.

### 3.3 Eficiencia de la Caldera de Agua Caliente

Existen 2 métodos reconocidos por la Asociación Estadounidense de Ingenieros Mecánicos ASME para el cálculo de la eficiencia de la caldera [2]. El primero de ellos es el "Método Directo", el cual mide la energía de entrada y salida del sistema, y el "Método Indirecto" o de cálculos de pérdidas, en donde se calculan las pérdidas significativas de la caldera.

La eficiencia de la caldera de agua caliente según el Método Directo, se puede definir como el cociente entre el calor absorbido por el agua y el calor disponible contenido en el combustible.

$$\eta = \frac{Q_{agua}}{Q_{combustible}} 100\% \quad (9)$$

El calor absorbido por el agua es fácilmente cuantificable, verificando la diferencia de temperatura alcanzada entre el agua de entrada y de salida.

$$\dot{Q}_{agua} = \frac{m c_{pa} (T_{salida} - T_{entrada})}{t} \quad (10)$$

donde  $m$  es la masa de agua contenida en el estanque de la caldera,  $c_{pa}$  el calor específico del agua, y  $t$  es el tiempo requerido para aumentar la temperatura desde  $T_{entrada}$  hasta  $T_{salida}$ .

El calor contenido en el combustible  $Q_{\text{combustible}}$  –poder calorífico neto– está definido como la energía liberada por un mol de componente durante el proceso de combustión completa con oxígeno.

La cantidad de calor que se puede aprovechar desde el combustible [57] se puede dividir en dos partes: el calor de combustión (poder calorífico inferior) y el calor físico.

$$Q_{\text{combustible}} = Q_{\text{combustion}} + Q_{\text{físico}} \quad (11)$$

El calor físico no es más que el calor contenido por la temperatura del combustible antes de ser quemado.

$$Q_{\text{físico}} = c_{pf} T_f m_{\text{combustible}} \quad (12)$$

donde  $C_{pf}$  es el calor específico del combustible, y  $T_f$  es la temperatura del combustible antes de la combustión.

El calor de combustión es el producto entre el Poder Calorífico  $H_{\text{PCI}}$  y la cantidad de combustible  $m_{\text{combustible}}$ .

$$Q_{\text{combustion}} = H_{\text{PCI}} \cdot m_{\text{combustible}} \quad (13)$$

Para los cálculos de la energía disponible, se utiliza el concepto de Poder Calorífico Inferior  $H_{\text{PCI}}$ , [57] el cual no toma en cuenta una cantidad de energía ocupada para evaporar las componentes de agua presentes en el combustible (ya que esta energía no se utilizará para traspasarlo al agua a calentar) y que es liberada en los gases de escape de la combustión.

A continuación se muestran algunos valores de  $H_{\text{PCI}}$ .

**Tabla 7. Valores Poder Calorífico Inferior y Superior [52]**

Tipo de combustible	$H_{\text{PCI}}$ Másico [kJ/kg] @ 25°C	$H_{\text{PCS}}$ Másico [kJ/kg] @ 25°C
<b>GLP</b>	45000	48800
<b>Gasolina</b>	43325	46800
<b>Diésel</b>	42500	45600
<b>Hidrógeno</b>	121000	141800
<b>Metano</b>	50000	55500
<b>Kerosene</b>	43000	46500
<b>Carbón (antracita)</b>	33300	34000
<b>Gas Natural</b>	46000	50200

La eficiencia de la caldera definida anteriormente es llamada la eficiencia global de la caldera, donde se toma en cuenta la energía disponible y la energía finalmente utilizada. Existen otras

eficiencias dentro del “sistema de calentamiento caldera”, como son la eficiencia de la combustión, que muestra que tan efectiva es la oxidación de los elementos, es decir, que tan efectiva es la combustión; la eficiencia estacional, que muestra la eficiencia de la caldera operando durante un periodo completo Invierno-Verano (esto debido al diferente comportamiento de la caldera con las condiciones ambientales) y eficiencia de la instalación, que es utilizada cuando las calderas son empleadas para calefacción de ambientes, y miden la eficacia de las tuberías para transportar calor.

### **3.3.1 Pérdidas en la caldera de agua caliente**

Para conocer el rendimiento de una caldera, se debe determinar las pérdidas de calor que posee. El método de cálculo de eficiencia es llamado Método Indirecto, la cual considera el cálculo analítico de las pérdidas que tienen un impacto significativo, agrupando todas las demás pérdidas no consideradas en un conjunto llamado “Pérdidas de difícil evaluación” [2] .

Existe un grupo de tres causas principales para las pérdidas significativas en la caldera, las cuales son:

1. Pérdidas de calor sensible en los gases secos de escape.
2. Pérdidas por la producción de vapor de agua.
3. Pérdidas por radiación y convección.

Las “Pérdidas de difícil evaluación” son:

1. Calor sensible de cenizas y escorias.
2. Calor latente de fusión de escorias.
3. Hidrógeno e hidrocarburos no quemados.
4. Radicales libres y disociación de especies.

Los dos primeros términos del grupo de “difícil evaluación” son los más significativos, los cuales requieren la obtención de la masa de las cenizas y escorias producidas en la combustión, además de clasificarlas. El tercer término requiere de una toma de muestra en el conducto de humos, y explica la formación de radicales CH y NO<sub>x</sub>. Esto requiere tiempo y metodologías rigurosas de toma de muestras, lo que hace más dificultoso la evaluación de las pérdidas de calor.

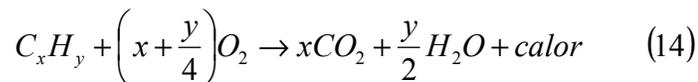
En las secciones que se presentan a continuación se detallan las pérdidas significativas y su método de cálculo.

### 3.3.2 Pérdidas de calor sensible por gases secos de escape

Las pérdidas por gases de escape (Stack Losses) representan el mayor porcentaje dentro de las pérdidas de la caldera. Su cantidad depende de la composición química del combustible, las condiciones en que se lleva a cabo la combustión, y la temperatura que alcanzan los gases a la salida de la chimenea. Se dice que son pérdidas por gases secos –o base seca– ya que no se toma en cuenta la pérdida de calor latente por la producción de vapor de agua en la combustión. Las bases teóricas para entender las pérdidas de calor por los gases de escape se presentan a continuación.

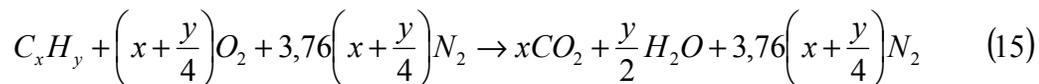
#### Combustión y oxígeno (Aire)

La combustión totalmente eficiente es la combustión completa, donde el combustible reacciona íntegramente con el oxígeno, formando dióxido de carbono, agua y calor, como lo muestra la siguiente ecuación estequiométrica para un combustible cualquiera:



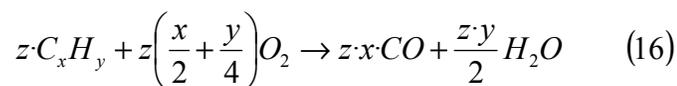
Los subíndices x e y indican las combinaciones de combustibles posibles.

Por lo general, la fuente de oxígeno necesaria para la combustión se obtiene del aire. Éste último se compone de alrededor de 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno (en volumen) en condiciones normales (1[atm] y 288°K). Al utilizar aire como fuente de oxígeno se agrega nitrógeno a la reacción, que por lo general no reacciona con éste:



No obstante, en ciertas condiciones de excesiva temperatura en la combustión (y tiempos de residencia prolongados), el nitrógeno puede oxidarse formando gases NOx [69], los cuales son muy tóxicos para el hombre. La formación de NOx se controla manipulando la temperatura de la llama y la cantidad de oxígeno –el exceso de aire– tal que no se generen condiciones para que exista oxidación del nitrógeno.

Un déficit de incorporación de oxígeno a la combustión puede provocar que ésta sea incompleta, es decir, los átomos de carbono no tienen suficiente oxígeno para el proceso de oxidación, lo que da lugar a moléculas de monóxido de carbono:



Aquí el subíndice “z” muestra la cantidad de moléculas de combustible.

La combustión incompleta ocurre cuando la mezcla entre aire y combustible es “rica” –más combustible que oxígeno comparada con la proporción estequiométrica ideal– y no todo el combustible tiene suficiente oxígeno para ser quemado completamente. Aquí existe una pérdida de eficiencia de la caldera que viene dada por la cantidad de “inquemados” (no quemados), y típicamente se determina midiendo la cantidad de monóxido de carbono de los gases de escape.

En la combustión, con el fin de asegurar una adecuada mezcla entre oxígeno y combustible, se utiliza un volumen en “exceso de aire” –mezcla “pobre”–. Sin embargo, cuanto mayor es la cantidad de exceso de aire, menor es el rendimiento de la caldera, ya que se está calentando una cantidad de aire mayor a la que se utilizará en la combustión y que escapa por los tubos de escape a una temperatura elevada [4] . Por lo tanto, es necesario controlar el exceso de aire para que por un lado no exista una combustión incompleta, con formación de inquemados y monóxido de carbono, y por otro lado, tal que no se caliente aire innecesariamente, perdiendo calor por los gases de escape.

La cantidad de aire necesaria teóricamente para obtener una combustión completa de un determinado combustible se obtiene de la forma que se explica a continuación.

Primero, se debe conocer la cantidad necesaria de oxígeno para quemar los elementos constituyentes del combustible. En general, los combustibles fósiles contienen un alto porcentaje de carbono, y en menor cantidad hidrógeno, azufre y cantidades menores de oxígeno.

**Tabla 8. Cantidad de O<sub>2</sub> necesario para combustión de C, H y S. [58]**

Elemento	Símbolo	Cantidad de kg de oxígeno para la combustión completa de 1 kg del elemento
<b>Carbono</b>	C	2,667
<b>Hidrógeno</b>	H	8,000
<b>Azufre</b>	S	1,000

Suponiendo que el aire se compone de 0,22[kg] de oxígeno por kilo de aire, entonces la cantidad de aire requerida para la combustión completa es de [58] :

$$RAC_0 = \frac{Aire}{combustible} = \frac{1}{0,22} (\%C \cdot 2,667 + \%H \cdot 8,000 + \%S \cdot 1,000 - \%O) [kg / kg] \quad (17)$$

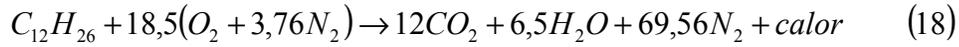
RAC<sub>0</sub> es la cantidad de aire necesaria para quemar 1 kg de combustible fósil teóricamente. Se conoce comúnmente como Relación Aire-Combustible RAC (*Air-Fuel Ratio, AFR*).

Un ejemplo a considerar es el caso de la combustión de petróleo Diésel.

El petróleo Diésel tiene una mezcla de hidrocarburos, con una composición química que varía de C<sub>10</sub>H<sub>22</sub> a C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>, siendo el más común el Diésel dodecano C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>. Los elementos que lo componen

son esencialmente carbono en un 86-88%; hidrógeno 12-13%; azufre 0,5% como máximo; oxígeno 0,002% y nitrógeno 0,08% [41] [60].

Dado estos datos, y suponiendo una combustión completa, la ecuación estequiométrica es:



Su cantidad de aire teórico requerido en condiciones normales es:

$$RAC_0 = 15,09 \left[ \frac{kg_{aire}}{kg_{comb}} \right]$$

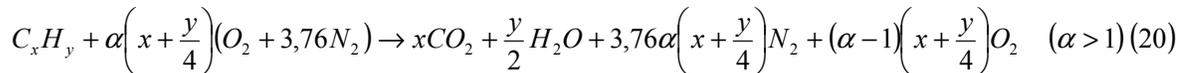
Claramente, a una altura elevada, donde la cantidad de oxígeno disponible es menor, la cantidad de aire requerido es mayor, por lo que una mayor cantidad de nitrógeno y otros gases son introducidos en la combustión. Un análisis más detallado se presenta en la sección *El problema de la combustión en gran altura*, descrito más adelante en la página 74.

Independientemente de este hecho, en las máquinas de combustión se trabaja con un exceso de aire ya que aunque se procure una mezcla muy buena, siempre habrá partículas de combustible que no se pondrán en contacto con la cantidad de oxígeno necesaria.

El exceso de aire se define como:

$$\alpha = \frac{RAC}{RAC_0} \quad (19)$$

donde RAC es la cantidad de aire utilizado en la práctica, y  $RAC_0$  es la cantidad de aire según la relación estequiométrica de la ecuación 19. Así, la ecuación estequiométrica, tomando en cuenta el exceso de aire  $\alpha$  es:



Como muestra la ecuación 20, si la combustión es completa los gases de escape se componen de dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno que no reaccionó con el combustible. Según esta última ecuación, la relación aire-combustible también se puede escribir como [65]:

$$RAC = \alpha \left( x + \frac{y}{4} \right) \cdot 4,76 \cdot \frac{28,97}{Wc} \left[ \frac{kg}{kg_{comb}} \right] \quad (21)$$

donde  $Wc$  es el peso molecular del combustible.

El exceso de aire también suele expresarse como porcentaje:

$$\alpha\% = \frac{RAC - RAC_0}{RAC_0} \quad (22)$$

## Productos de la combustión (Humos)

Los productos de la combustión, en todas sus posibilidades, se componen de  $\text{CO}_2$ ;  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{N}_2$ ;  $\text{O}_2$ ;  $\text{CO}$ ;  $\text{CH}_x$ ;  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ . El dióxido de azufre aparece inevitablemente por la cantidad pequeña de azufre que contienen los combustibles fósiles.

Como ya se mencionó, en condiciones ideales de combustión completa sin exceso de aire sólo existe dióxido de carbono que se libera en los gases de combustión, y la cantidad puede ser determinada aplicando las leyes de conservación de masa. En cualquier otra situación, la cantidad de gases puede determinarse planteando las ecuaciones para cada especie, elevando el número de variables y la complejidad del problema. Lo más común es la medición in situ de los gases de escape. El aparato tradicional para hacer las mediciones es el Analizador de Orsat, el cual entrega porcentajes de gases en un volumen de control [65], o utilizando medidores electrónicos de gases.

Sin embargo, conociendo los componentes elementales de los combustibles, es posible construir un diagrama que entregue todas las posibilidades de combustión, dando información acerca de la cantidad de  $\text{CO}_2$  como producto de la reacción, la cantidad de  $\text{O}_2$  y el exceso de aire necesario para ese punto de operación. El diagrama triangular es trabajo de Wilhelm Ostwald [14], y es relativamente sencillo de construir para cada combustible. Del diagrama de Ostwald, la cantidad máxima de  $\text{CO}_2$  como producto de una combustión completa sin exceso de aire está dada por [16]:

$$CO_{2\max} = \frac{21}{\left(100 + 79 \frac{3(\%H - \%O/8)}{\%C}\right)} \quad (23)$$

donde las variables C, H y O son las cantidades de aquellos elementos químicos presentes en el combustible. Así, para el caso del petróleo Diésel, la cantidad máxima de  $\text{CO}_2$  en una combustión completa es:

$$CO_{2\max} = \frac{21}{\left(100 + 79 \frac{3(0,12 - 0,00002/8)}{0,8795}\right)} = 0,1586 \quad (24)$$

Es decir, los gases de escape se compondrán de un 15,86% de  $\text{CO}_2$ . Estos son los valores típicos que se encuentran en combustiones de combustibles fósiles.

La Tabla 9 muestra algunos combustibles y sus porcentajes de CO<sub>2</sub> típicos.

**Tabla 9. Constituyentes de Combustibles y cantidad de CO<sub>2</sub> en combustión [58] .**

Constituyentes [%]	Clase de Combustible			
	Carbón	Madera	Petróleo	Gas Natural
<b>C</b>	79,86	50,31	84,00	---
<b>H<sub>2</sub></b>	5,02	6,20	12,70	1,82
<b>O<sub>2</sub></b>	4,27	43,08	1,20	0,35
<b>N<sub>2</sub></b>	1,86	0,04	1,70	3,40
<b>S</b>	1,18	---	0,40	---
<b>Ceniza</b>	7,81	0,37	---	---
<b>CO</b>	---	---	---	0,45
<b>CO<sub>2</sub></b>	---	---	---	0,22
<b>CH<sub>4</sub></b>	---	---	---	93,33
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	---	---	---	0,25
<b>H<sub>2</sub>S</b>	---	---	---	0,18
<b>Exceso de aire [%]</b>	Porcentaje de CO <sub>2</sub> correspondiente a diferentes valores de exceso de aire			
<b>0</b>	18,43	20,10	15,40	11,65
<b>20</b>	15,29	16,72	12,09	9,54
<b>40</b>	13,06	14,31	10,79	8,07
<b>60</b>	11,40	12,51	9,38	6,99
<b>80</b>	10,11	11,12	8,30	6,17
<b>100</b>	9,09	10,00	7,45	5,52

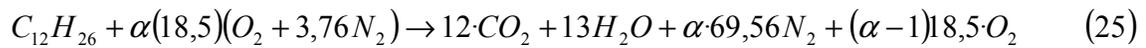
### Cálculo de las pérdidas según ecuación química

Es posible hacer un análisis exhaustivo de las pérdidas a través de ecuaciones químicas. Conociendo completamente los productos de la combustión, se pueden determinar las masas y con ello el calor sensible en cada uno de los productos. Ello requiere saber si la combustión es completa o incompleta, la temperatura de la llama, el tipo de combustible y sus componentes, la humedad relativa del aire, entre otras variables.

A continuación se estudiará la combustión completa del Diésel común C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> de manera metódica, sujeta a ciertas suposiciones. Para definir la ecuación química de la combustión, se asume que el combustible no tiene más componentes que carbono e hidrógeno, y además la combustión es completa con un exceso de aire  $\alpha$ . Esto quiere decir que en el análisis de la combustión, no se

tomará en cuenta la concentración y/o producción de monóxido de carbono CO, y que la cantidad de inquemados de combustible es despreciable.

Sea entonces la ecuación de combustión:



Los gases de escape son dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno en exceso.

La proporción de moles en los gases de escape es idéntica a la proporción en volumen de los gases de escape, por lo que la cantidad de dióxido de carbono en porcentaje es:

$$\%_{vol} CO_2 = \left[ \frac{12}{\alpha \cdot 88,06 - 6,5} \right] \cdot 100 \quad (26)$$

Se puede apreciar claramente que al aumentar el exceso de aire en la combustión, la cantidad de CO<sub>2</sub> que se puede encontrar en los gases de escape es menor en relación al volumen total. Experimentalmente, la cantidad de dióxido de carbono se calcula a través de la cantidad de oxígeno en los gases secos de escape. La cantidad en volumen de oxígeno es:

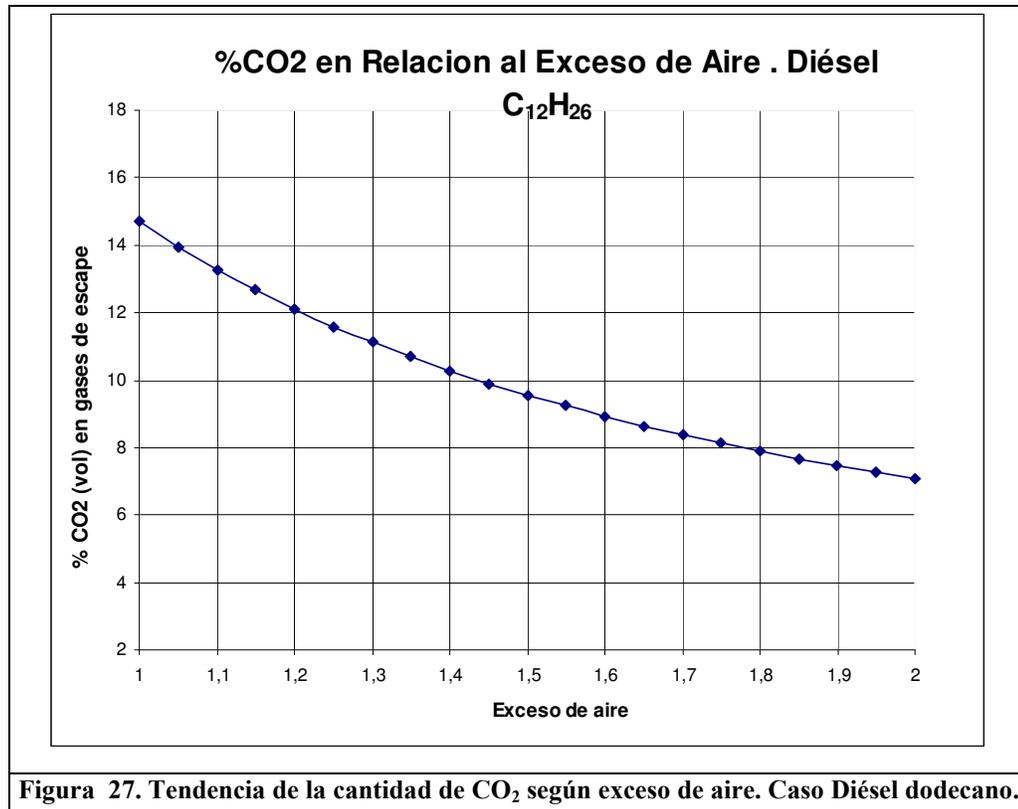
$$\%_{vol} O_2 = \left[ \frac{(\alpha - 1)18,5}{\alpha \cdot 88,06 - 6,5} \right] \cdot 100 \quad (27)$$

Reemplazando el exceso de aire, se puede conocer la relación entre la cantidad de CO<sub>2</sub> sabiendo el O<sub>2</sub> de los gases:

$$\%_{vol} CO_2 = 12,69 - 0,64 \cdot (\%_{vol} O_2) \quad (28)$$

El anterior resultado es válido para el caso particular del Diésel estudiado.

La Figura 27 muestra la curva construida en base a la ecuación 28.



Las pérdidas se evalúan de acuerdo a  $Q = m \cdot C_p \cdot (T - T_0)$  para cada elemento de los gases de escape, donde  $m$  es la masa y  $c_p$  es el calor específico a presión constante de cada especie,  $T_0$  la temperatura estándar (25°C) y  $T$  la temperatura de salida del gas. Para obtener la masa  $m$  se requiere el peso molecular de cada elemento, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 10. Peso molecular de gases. Ref: [84]**

Especie	Peso Molecular [g/mol]
<b>CO<sub>2</sub></b>	44,01
<b>H<sub>2</sub>O</b>	18,015
<b>N<sub>2</sub></b>	28,01
<b>O<sub>2</sub></b>	32

El calor específico de cada especie se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11. Calor específico de gases. Ref: [85] .**

Temperatura [°C]	$c_p$ [J/kg °K] @ 1[atm]			
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
0	811	1874	1035	928,7
50	866,6	1874	1042	921,7
100	914,8	1887	1041	931,8
200	995,2	1935	1050	964,7
300	1060	1997	1070	997,1
400	1112	2066	1095	1025
500	1156	2137	1120	1048
1000	1292	2471	1213	1121

Las pérdidas de calor se establecen en relación a los gases secos, por lo que la suma de las pérdidas por CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> determinará la pérdida total por gases de escape:

$$Q_p = X_{mol} \cdot W \cdot c_p(T) \cdot (T - 25) \quad (29)$$

donde  $X_{mol}$  es la cantidad de moles de la especie en los gases de escape,  $W$  es el peso molecular de la especie,  $c_p$  su calor específico a presión constante a la temperatura de los gases de escape  $T$ .

Para una temperatura de gases de escape de 200°C, las pérdidas por cada especie son las que se indican en la Tabla 12:

**Tabla 12. Pérdidas de calor por cada tipo de gas de escape.**

<b>CO<sub>2</sub></b>	$Q_{CO_2} = 12 \cdot 44,01 \cdot 995,2 \cdot (200 - 25) = 91,977[kJ]$	
<b>N<sub>2</sub></b>	$Q_{N_2} = \alpha \cdot 69,56 \cdot 28,066 \cdot 1050 \cdot (200 - 25) = \alpha \cdot 358,730[kJ]$	
<b>O<sub>2</sub></b>	$Q_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot 18,5 \cdot 32 \cdot 964,7 \cdot (200 - 25) = (\alpha - 1) \cdot 99,943[kJ]$	
<b>Total</b>	$Q_p = Q_{CO_2} + Q_{N_2} + Q_{O_2} = \alpha \cdot 458,673 - 7,966[kJ]$	(30)

Las pérdidas totales quedan en función del exceso de aire. De la ecuación 30 se observa el aumento lineal que tienen las pérdidas en función del exceso de aire.

Si se toma el valor del poder calorífico inferior del Diésel como 45[kJ/g], sabemos que 1 mol de C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> posee 170 [g] (peso molecular de 170[g/mol]), entonces el calor disponible (sin tomar en cuenta el calor físico del Diésel) es de 7650[kJ].

Las pérdidas en porcentaje debido a los gases de escape finalmente son:

$$\%Qp = \left[ \frac{\alpha \cdot 458,673 - 7,966}{7650} \right] \cdot 100 \quad (31)$$

Si se usa el valor de  $\alpha = 1$  se obtiene:

$$\%_{vol} CO_2 = 14,71$$

$$\%Qp = 5,89$$

Si tomamos en cuenta que el exceso de aire para una caldera Diésel es típicamente de  $\alpha = 1,2$ , entonces las pérdidas de calor –suponiendo la misma situación anterior– suben a un 7,01%, con una cantidad de CO<sub>2</sub> de 12,1%.

## Control de pérdidas de calor sensible por chimenea

Para optimizar la eficiencia de la caldera de agua caliente se deben de minimizar la temperatura de salida de los gases de escape, así como también maximizar la cantidad de dióxido de carbono en los gases de escape. Estas dos variables se controlan por lo general con el exceso de aire de la caldera.

Como se explicó, se requiere de una cantidad de oxígeno determinada por la ecuación estequiométrica de combustión, y cuya fuente es el aire (ecuación 25). Al trabajar con un exceso de aire por sobre un óptimo, la temperatura de la llama disminuye pero se calienta más aire del necesario para la combustión. Al trabajar con un déficit de aire, no se logra una combustión completa, encontrándose inquemados, monóxido de carbono, una temperatura de llama mayor, y una menor cantidad porcentual de  $\text{CO}_2$  en los gases de escape.

Dados estos dos comportamientos, existe una cantidad óptima de exceso de aire para cada combustible, y que dada las condiciones de operación (como temperatura y densidad del aire) pueden variar.

A continuación en la Figura 28 se muestra una tendencia típica general de la relación entre el exceso de aire y las pérdidas de calor (Figura 28).

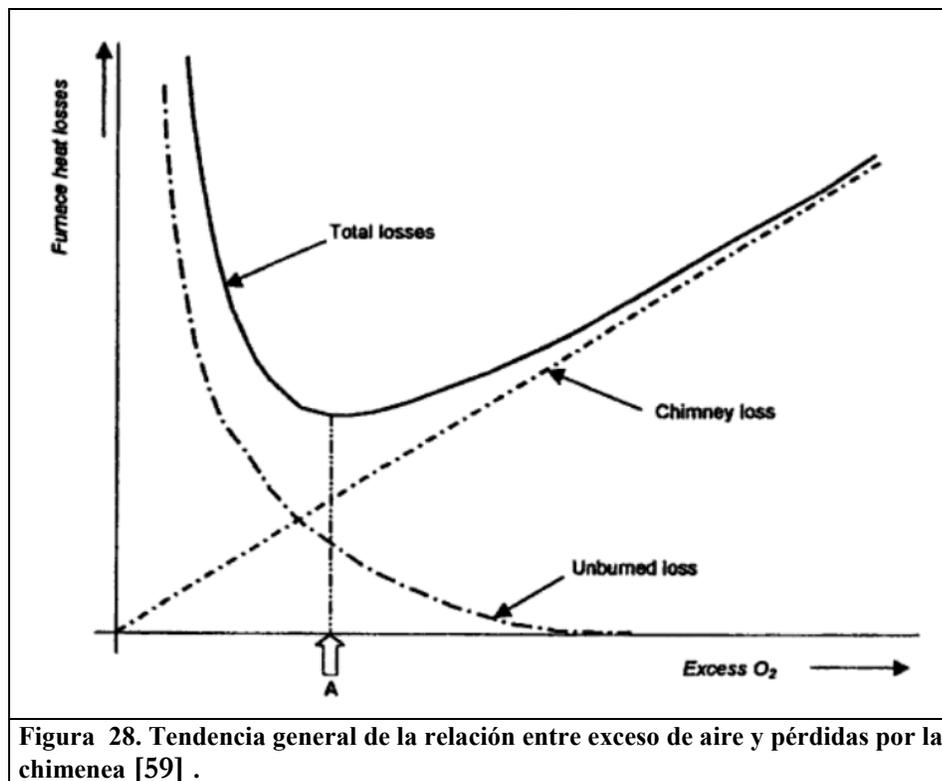
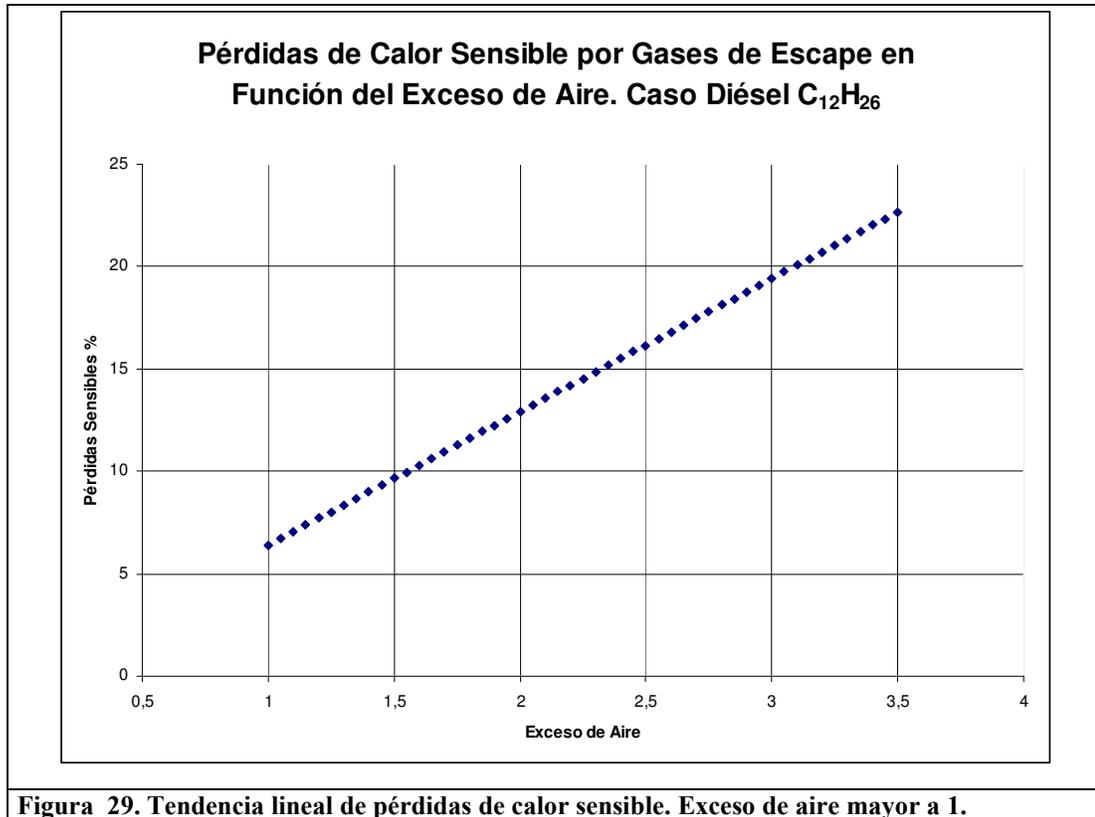


Figura 28. Tendencia general de la relación entre exceso de aire y pérdidas por la chimenea [59] .

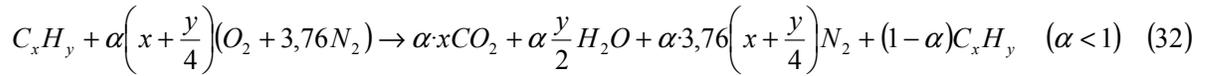
La Figura 28 muestra que con un exceso de aire las pérdidas de calor son lineales, y en el caso de déficit de aire el comportamiento es inversamente proporcional.

Del análisis realizado en la sección anterior, podemos observar que si se supone un exceso de aire en la combustión, y combustión completa, efectivamente las pérdidas son lineales respecto al exceso de aire. A continuación se muestra en la gráfica de la Figura 29 de las pérdidas para el caso del Diésel común analizado.

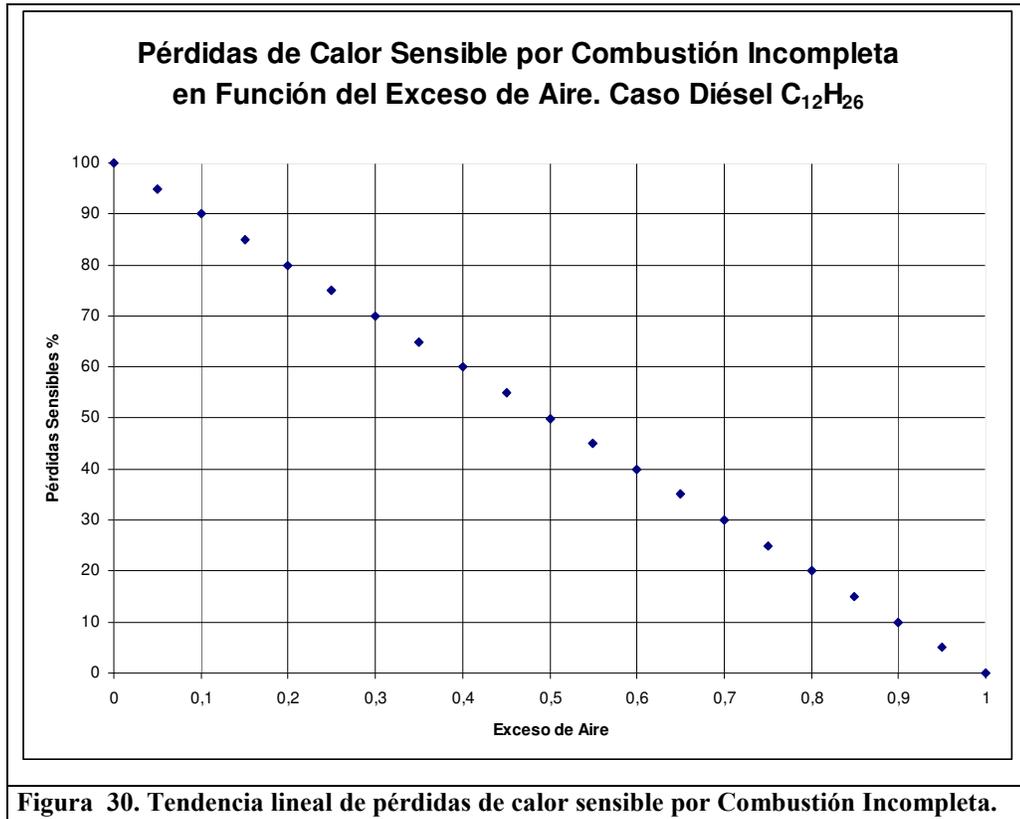


El exceso de aire recomendado que minimiza las pérdidas para una caldera a petróleo es de 15 a 25% típicamente en condiciones de operación reales. Como referencia, para calderas a carbón (pulverizado) el exceso de aire es de un 15 a 40%, para gas un 5 a 10%, y para madera de un 25 a 35% [66] .

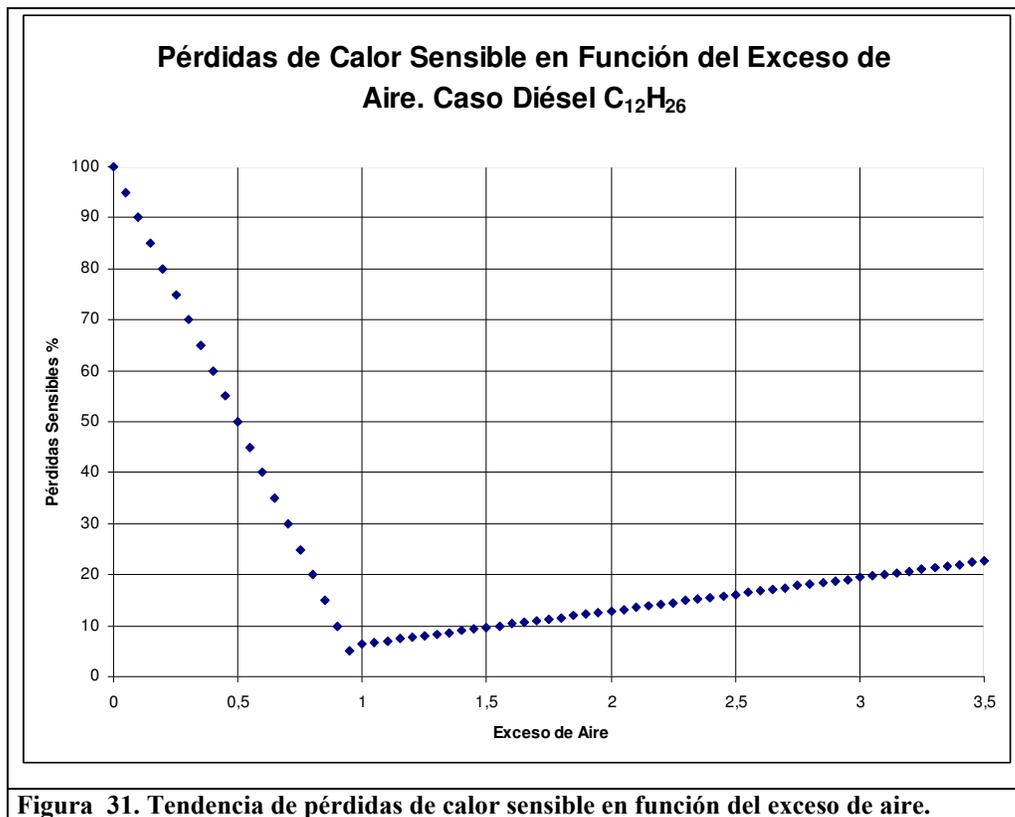
En el caso de un déficit de aire –y considerando que existe combustión completa– el complemento del porcentaje de déficit de aire,  $(1 - \alpha)$ , entrega el valor de combustible no quemado.



Así se obtiene una relación proporcional que se aprecia en la Figura 30:



Complementando los gráficos de las Figura 29 y Figura 30, se aprecia una curva que muestra el comportamiento general de las pérdidas de calor sensible en función del exceso de aire (Figura 31).



La curva es similar a la descrita en la literatura y mostrada en la Figura 28.

### **El problema de la combustión en gran altura**

Cuando se requiere operar una máquina de combustión a gran altura, se debe tomar en cuenta que el oxígeno necesario se encuentra en una menor concentración por volumen, por lo que la cantidad de aire necesaria será mayor. En particular, el estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo es estudiado por la rama de la ciencia llamada Sicrometría. En ella, es usual ocupar la hipótesis de tomar el comportamiento del aire como un gas ideal, ya que a presiones bajo 1[atm] el aire no sobrepasa los límites de temperatura entre -20 y 50°C y el error cometido al suponer esta condición es muy pequeño [1] [38] .

En base a esto, sabiendo la cantidad de moles teóricos requeridos en la combustión completa, podemos ocupar la ecuación de los gases ideales para conocer el volumen de aire requerido a una presión y temperatura dadas, la cual es:

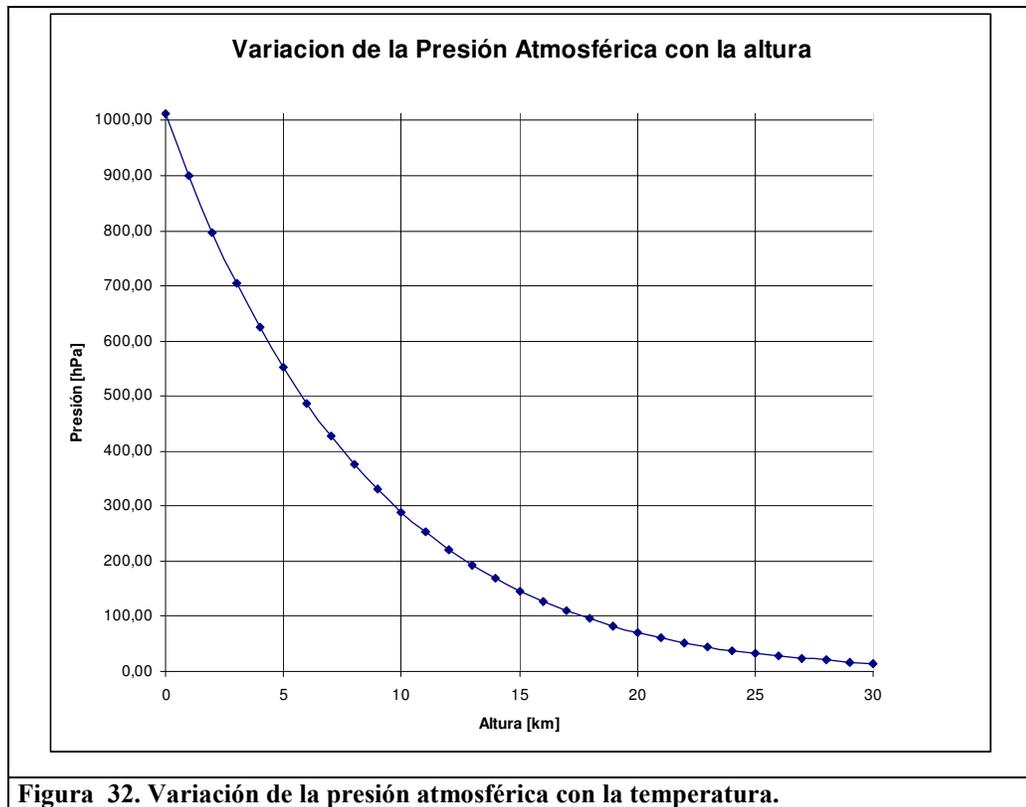
$$V = \frac{nRT}{P} \quad (33)$$

donde n es el número de moles del aire, R la constante universal, T la temperatura y P la presión atmosférica. La presión atmosférica sigue una ley dada por [51] :

$$P_2 = P_1 \left( 1 - z \frac{\Gamma}{T_0} \right)^{\frac{g}{R\Gamma}} \quad (34)$$

donde  $P_1$  es la presión de una atmósfera estándar 1[atm] ó 1013,3[hPa],  $T_0$  es la temperatura estándar de 288[°K],  $\Gamma$  es el decaimiento de la temperatura con la altura que en este caso se toma constante e igual a 3[°K/km], g es la gravedad 9,8[m/s<sup>2</sup>] y R es la constante de los gases para el aire 286,9[N·m/kg °K], y z es la altura en kilómetros.

La característica de variación de la presión con la altura se observa en la Figura 32 mostrada a continuación.



Si tomamos como referencia un lugar a 5[km] de altura, tal como ocurre en las faenas mineras de cobre en Chile, la presión atmosférica desciende a 540,06[hPa], es decir, la presión es un 53,29% con

respecto al nivel del mar. La temperatura media que podemos encontrar a  $z$ [km] de altura viene dada por:

$$T = T_0 - \Gamma z \quad (35)$$

encontrándose una temperatura de 237°K (0°C) a 5[km] de altura.

De la ecuación estequiométrica de la combustión (ecuación 25 con  $\alpha = 1$ ):



vemos que el número de moles de aire requerido es:

$$n_{aire} = 18,5 \cdot (1 + 3,76) = 88,06 \text{ mol}$$

Con estos datos, podemos ver las diferencias en volumen de aire para ambas situaciones evaluando la ecuación de los gases ideales, lo cual se resume en la Tabla 13.

**Tabla 13. Volumen de aire calculado a 5000 msnm que contienen 88,06 [mol].**

Situación 1	Situación 2
$T_0=288^\circ\text{K}$ $P=1013,3[\text{hPa}]$	$T_0=273^\circ\text{K}$ $P=540,06[\text{hPa}]$
<b>Altura <math>z</math></b> [km]	<b>Volumen</b> [m <sup>3</sup> ]
0	2,081
5	3,704

Se aprecia que el volumen requerido a 5[km] de altura, con una presión de 540,06[hPa], una temperatura de 273°K para 88,06 moles de aire es un 77,9% mayor que el volumen a nivel del mar.

Si hacemos el análisis en relación a la densidad del aire, que es:

$$\rho = \left(\frac{M}{R}\right)\left(\frac{P}{T}\right) \quad (36)$$

donde  $M$  es la masa de aire 28,97[g/mol], se observa que la situación descrita en la Tabla 14 para ambos casos.

**Tabla 14. Densidad de aire calculado a 5000 msnm que contienen 88,06 [mol].**

Situación 1	Situación 2
$T_0=288^\circ\text{K}$ $P=1013,3[\text{hPa}]$	$T_0=273^\circ\text{K}$ $P=540,06[\text{hPa}]$
<b>Altura <math>z</math></b> [km]	<b>Densidad</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
0	1,226
5	0,689

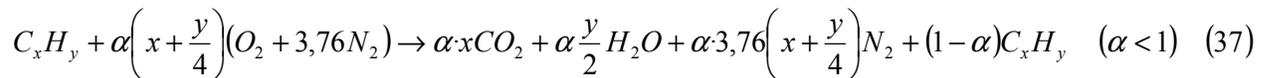
De la Tabla 14, la densidad a 5[km] de altura con las condiciones de la Situación 2 es de un 56,2% con respecto a la Situación 1.

Esto quiere decir, y tomando como ejemplo el caso de la  $RAC_0$  del Diésel, que si requerimos de 15,09[kg] de aire por kg de combustible, a nivel del mar se traduce en un volumen de  $V = RAC_0/\rho = 12,44[m^3]$  de aire.

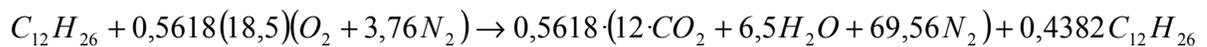
Si una caldera se opera a 5[km] de altura, absorbiendo el mismo volumen de aire pero con una densidad menor, sólo está consiguiendo añadir a la mezcla 8,57 [kg] de aire, un 56,18% de lo requerido teóricamente.

Esto tiene consecuencias en la eficiencia de la caldera, dado que si no se modifica el volumen de aire requerido, se encuentra en una situación de déficit de aire con combustión incompleta.

La ecuación de combustión con déficit de aire es:



Se aprecia que por el déficit de aire, hay una cantidad de combustible que no se está quemando, lo que reduce la eficiencia de la caldera por inquemados. Además, la cantidad de  $CO_2$  es menor, lo que también aumenta las pérdidas por la chimenea. Si tomamos este déficit de aire del caso de la combustión de Diésel a 5[km] de altura la ecuación de combustión ( $\alpha = 0,5618$ ) es:



Esto quiere decir que por cada mol de combustible, hay un 43,82% que no es quemado (44% menos de eficiencia de combustión). La cantidad teórica de  $CO_2$  se reduce a un 56,18% aumentando a casi un 12% las pérdidas por gases de escape. Aún si las calderas son acondicionadas, existe una pérdida de potencia que se refleja en un sobre dimensionamiento importante de las calderas.

### 3.3.3 Pérdidas por la producción de vapor de agua

La ecuación estequiométrica de la combustión (ecuación 25) indica que como producto del combustible, aparece vapor de agua debido a la oxidación del hidrógeno. El vapor de agua, como gas de escape, contiene una cantidad de calor que se pierde de la misma forma con que se pierde el calor de los demás gases de escape. El calor producto de este fenómeno es cuantificado de manera separada debido a que en las tomas de muestras de los gases de escape, la técnica empleada utiliza “química húmeda”, es decir, el vapor de agua se condensa durante el proceso de toma de muestra, y los resultados no toman en cuenta ese vapor condensado. Sin embargo, este calor debe cuantificarse como pérdida. Su cuantificación sigue la siguiente recomendación [2] .

$$L_H \% = \frac{9 \cdot H_2 \cdot [(entalpia\ vapor\ @1\ psig\ y\ T^\circ\ escape) - (entalpia\ liquido\ @\ T^\circ\ entrada)]}{H_{PCS}} \cdot 100 \quad (38)$$

Las cantidades en esta fórmula se expresan en unidades británicas, y para el caso del Diésel es:

$$L_H \% = \frac{9 \cdot H_2 \cdot [(1055 + (0,467 \cdot T^\circ\ escape)) - (T^\circ\ entrada - 32)]}{19600} \cdot 100 \quad (39)$$

con  $H_2$  la cantidad porcentual de hidrogeno en el combustible (alrededor de 12%),  $T^\circ\ escape$  es la temperatura de los gases de escape en [°F], y  $T^\circ\ entrada$  es la temperatura del líquido a la entrada en [°F]. Sin embargo, también se puede estimar esta pérdida a través de la diferencia entre el poder calorífico inferior y superior. Para el caso del Diésel común, la diferencia según la Tabla 7 es de un 6,79%.

La fórmula nos dice que si aumenta la temperatura de los gases de escape, el calor perdido por el vapor de agua generado aumenta, sin embargo, si la temperatura de los gases de escape sube desde 50°C hasta los 300°C las pérdidas no cambian en más de un 1%, y tampoco baja del 1% si la temperatura de escape se acerca a la temperatura de entrada, por lo que podemos tomar el valor de las diferencias de los poderes caloríficos como un valor medio y no tomar en cuenta la temperatura de los gases de escape para verificar las pérdidas de calor.

A continuación en la Tabla 15 se presentan las pérdidas por vapor de agua para diferentes temperaturas de los gases de escape.

**Tabla 15. Porcentaje de pérdidas por vapor de agua en función de la temperatura de los gases de escape**

T° gases escape [°C]	T° entrada líquido [°C]	T° gases escape [°F]	T° entrada líquido [°F]	Pérdidas por vapor de H <sub>2</sub> O [%]
50	10	122	50	6,03
100	10	212	50	6,26
150	10	302	50	6,49
200	10	392	50	6,72
250	10	482	50	6,95
300	10	572	50	7,19

### 3.3.4 Pérdidas por radiación y convección

Las pérdidas por radiación y convección son independientes del tipo de combustible que se utilice en la caldera, y son proporcionales a la superficie externa de la caldera. No son comúnmente medibles, pero con la tecnología y desarrollo de las calderas actuales las pérdidas son casi constantes, y se toman valores fijos promedio para una determinada caldera. Los valores porcentuales van desde los 0,5 a 5% como máximo para las calderas de agua caliente. Se ha estudiado que existe una relación entre la carga de la caldera y sus pérdidas por radiación y convección. A menor carga, existe un aumento de las pérdidas, y cuando la carga se aproxima a 100%, las pérdidas por radiación son mínimas. La Tabla 16 muestra aproximadamente las pérdidas por este concepto, considerando calderas de una potencia de hasta 58 [MW] (200 MM BTU/h), con una configuración convencional (como calderas empaquetadas), exceptuando las instalaciones de cogeneración que tienen sistemas separados de agua y calor. La primera columna está extraída del estándar ASME [2] (carga al 100%) y el resto de las columnas se construyeron dividiendo las pérdidas al 100% por el porcentaje de carga de la columna.

**Tabla 16. Porcentaje de pérdidas de calor por radiación en función de la carga de la caldera.**

Potencia Máxima de salida [MBTU/h]	Potencia Máxima de salida [MW]	Pérdidas [%] (Carga 100%)	Pérdidas [%] (Carga 80%)	Pérdidas [%] (Carga 60%)	Pérdidas [%] (Carga 50%)	Pérdidas [%] (Carga 40%)	Pérdidas [%] (Carga 20%)
10	2,931	1,60	2,00	2,67	3,20	4,00	8,00
20	5,861	1,05	1,31	1,75	2,10	2,62	5,25
30	8,792	0,84	1,05	1,40	1,68	2,10	4,20
40	11,723	0,73	0,91	1,22	1,46	1,82	3,65
50	14,654	0,66	0,82	1,10	1,32	1,65	3,30
60	17,584	0,62	0,78	1,03	1,24	1,55	3,10
70	20,515	0,59	0,74	0,98	1,18	1,48	2,95
80	23,446	0,56	0,70	0,93	1,12	1,40	2,80
90	26,377	0,54	0,68	0,90	1,08	1,35	2,70
100	32,238	0,52	0,65	0,87	1,04	1,30	2,60
120	35,169	0,48	0,60	0,80	0,96	1,20	2,40
140	41,030	0,45	0,56	0,75	0,90	1,12	2,25
160	46,892	0,43	0,54	0,72	0,86	1,08	2,15
180	52,753	0,40	0,50	0,67	0,80	1,00	2,00
200	58,614	0,38	0,48	0,63	0,76	0,95	1,90

### 3.4 Equipos de Control de Sistemas de Calderas

El control de una caldera está pensado para mantener el equilibrio entre el gasto de agua, combustible y energía, y las variaciones de la demanda de agua caliente. En el esquema de la Figura 33 se muestra un control básico de una caldera, en donde la variable a controlar es la temperatura del agua.

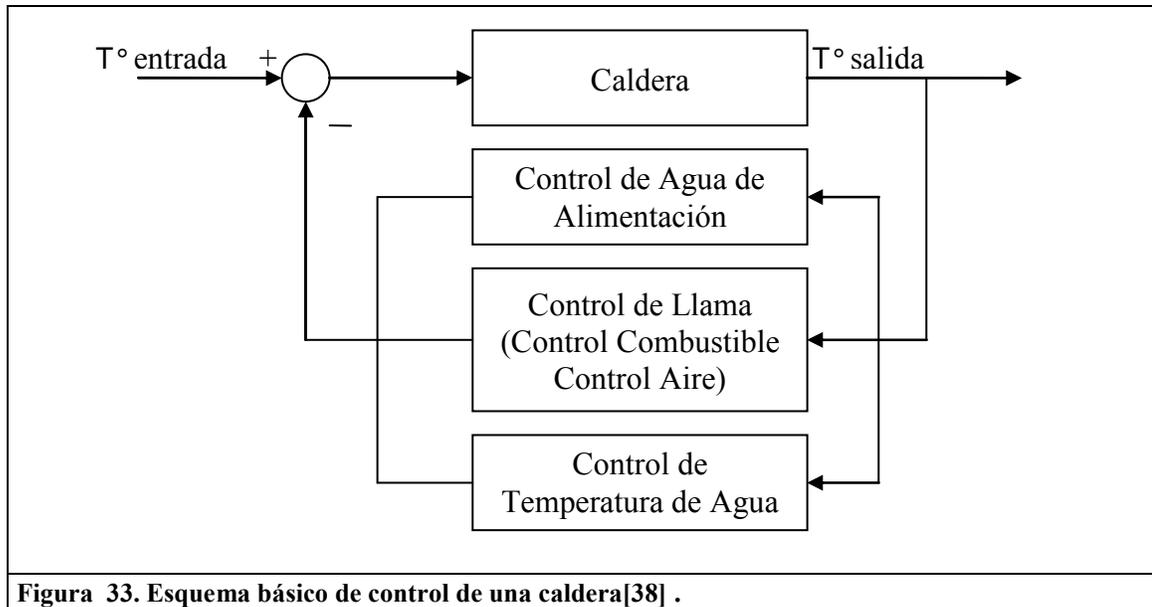


Figura 33. Esquema básico de control de una caldera[38] .

El control de potencia de la caldera implica actuar sobre distintas variables para lograr el equilibrio energético y másico. Para lograr el equilibrio energético se actúa sobre la llama del hogar, controlando el combustible (la presión de entrada, el flujo y la temperatura del mismo) y el aire requerido para la combustión. El equilibrio másico se logra a través del control de nivel de agua de alimentación.

El control de una caldera posee lazos de control multivariable ya que la variación de una de las variables afecta otra variable manipulada.

Los distintos lazos de control en la caldera de agua caliente se pueden resumir en:

- Control de la presión del combustible: La presión de las bombas de combustible es función del flujo del mismo, que a su vez depende de la demanda. Para lograr la presión constante se regula a través de un retorno de combustible al estanque de almacenamiento, compensando la variación del flujo hacia los quemadores.

- Control de la temperatura del combustible: Se requiere para mantener la viscosidad del combustible en un valor deseado para su correcta atomización.
- Control del nivel de agua de alimentación: Para evitar el aumento de la temperatura y presión al interior de la caldera, el nivel de agua dentro de ella debe permanecer dentro de unos límites dados por los fabricantes.
- Control de la combustión: Este lazo debe mantener la relación aire-combustible en un rango que asegure una combustión continua y una llama estable. Además, debe procurar que el aporte de calor en el hogar o del quemador no exceda los límites especificados por los fabricantes. Es afectado por el lazo de control de temperatura, el cual le envía la señal de demanda energética al control de combustión.
- Control de Tiro: tiene como objetivo mantener la presión del hogar cercana a cero, a través de ventiladores de tiro inducido para que provoque más o menos presión.
- Control de temperatura del agua: este lazo tiene como objetivo generar una señal que usarán los controles de aire y de combustible. Al regulador se le suele llamar Master.

Los controles que suelen utilizarse son del tipo on-off, proporcional, integral y derivativo. Para los loops de flujo y de nivel se utiliza generalmente un control proporcional integral, en el caso de los loops de presión y temperatura se utiliza un control PID cuando se requiere de una respuesta muy rápida. Al tener múltiples lazos de control, los PLC son comúnmente usados en la mayoría de las calderas modernas [77].

### **3.5 Costos a Considerar en el Uso de un Sistema de Calderas**

Cuando se requiere evaluar económicamente una caldera de agua caliente, no sólo se debe tomar en cuenta el costo de inversión y del combustible, sino una serie de ítems que a continuación se listan.

Dentro de los costos de inversión en una caldera de agua caliente, se encuentran:

- Caldera propiamente tal.
- Quemadores.
- Chimenea.
- Tablero eléctrico.
- Estanque de acumulación de combustible.

Además, en la mayoría de las aplicaciones las calderas se utilizan en un circuito cerrado de agua, en donde el agua calentada es tratada para minimizar su dureza, y junto con intercambiadores de calor para aumentar la temperatura del fluido que se quiere calentar. Por ello, también debe tomarse en cuenta dentro de los costos de inversión los siguientes:

- Bombas de recirculación de agua caliente.
- Estanques de expansión de agua.
- Intercambiadores de calor.
- Ablandadores de agua.
- Piping y válvulas.

Los costos de operación de las calderas se pueden dividir en [15] [62] :

- Aditivos para tratamiento de agua.
- Personal de operación de la caldera.
- Consumo de combustible.
- Consumo de energía eléctrica de bomba inyectora de petróleo.
- Precalentamiento del petróleo.
- Mantenimiento de la caldera.
- Costo de transporte del petróleo.
- Costo (financiero) de almacenamiento del petróleo.

### **3.6 Disponibilidad de los Equipos y Fallas Típicas**

Por lo general, los problemas de operación son causados por descuidos o abandono de mantenimientos. Algunos de estos son:

- Obstrucciones por depósitos: En las calderas de vapor o agua, existen depósitos que causan obstrucciones en las cañerías. Estos depósitos hacen que el diámetro de la cañería disminuya, provocando aumentos de temperaturas si se trata de tubos de convección de calor, o aumentos de presiones en el caso que la tubería contenga agua o vapor. Los depósitos debido al agua se pueden tratar. Es una operación común el tratamiento de agua y la eliminación de depósitos tanto en el estanque de la caldera como en las tuberías.

- Corrosión: Al igual que el caso de los depósitos, la corrosión por sales y minerales depositados en la caldera producen un adelgazamiento de los metales de la caldera y las cañerías, pudiendo provocar grietas y/o rupturas.
- Vibraciones: Es la mayor causa de fallas en las calderas de vapor. Éstas producen fatiga de materiales por el movimiento o fatiga por roce de los metales. Estas vibraciones son principalmente producto de oscilaciones en el fluido por cambios de presiones, causada por variaciones de la válvula de paso u ondas vibracionales que viajan por la red de tuberías y llegan a la caldera.
- Fatiga térmica: Se produce por las variaciones de estrés térmico dada las variaciones de temperaturas. Estos cambios de temperatura se dan por diferentes puntos de operación, o por encendidos y apagados de la caldera. La fatiga térmica produce grietas en los materiales, que bajo presión pueden fácilmente explotar.
- Bajo nivel de agua: Ocurre en calderas de agua caliente. El nivel de agua siempre debe mantenerse sobre un nivel mínimo. Si ocurre lo contrario, se producen elevaciones de temperatura que dañan los materiales y provocan aumentos de presiones.

En procesos que sean críticos para las industrias (los cuales no se pueden detener o fallar), se deben tomar las precauciones del caso colocando calderas de respaldo debido a la posibilidad de que éstas fallen (criterio de seguridad N-1).

### **Mantenimiento**

Debido a los procesos que ocurren dentro de la caldera (combustión, llamas, evaporación, sedimentación) es necesario realizar una mantención periódica a la caldera que maximice la vida útil de ésta.

Así por ejemplo existen mantenciones semanales que las realizan los mismos operadores de las calderas, y que no requieren de mayores intervenciones en el proceso, tales como:

- Inspección visual de los quemadores y pilotos, de la limpieza de la llama, y de los equipamientos de control.
- Chequeo de las válvulas tanto de alimentación de agua como de combustible.
- Confirmación que el área de la caldera esté libre de materiales combustibles, que no obstruyan el paso.
- Chequeo de los controles de límite y de nivel de agua funcionen correctamente.

También existen mantenciones más específicas y que se realizan por lo general 1 vez al año, como son:

- Test de fuga de piloto y de válvulas de combustible.
- Eliminación de cenizas y escorias de la chimenea de escape.
- Chequeo del tanque de presión y de las cañerías
- Chequeo de los controles para el control del piloto, de límite máximo, de mínimo nivel de agua.
- Revisión de los quemadores para asegurarse que la ignición de todos los quemadores ocurran cuando las válvulas de combustible estén abiertas.

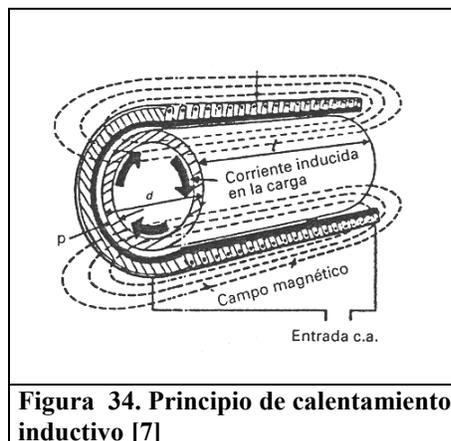
Éstas últimas deben hacerse por una empresa especialista o fabricante de calderas, lo que agrega un costo de operación anual no despreciable.

## Capítulo 4

# Sistema de Calentamiento Inductivo

El fenómeno de inducción de corrientes debido al campo magnético es un tema conocido desde el siglo XIX gracias al físico Michael Faraday, que describió por primera vez este comportamiento al experimentar con bobinas. A partir de sus investigaciones y con el aporte de importantes físicos durante el siglo XIX, se desarrollaron las máquinas eléctricas que conocemos hoy, como transformadores, generadores y motores eléctricos.

Una corriente alterna que circula por una bobina crea un campo magnético alterno. Este campo induce –por ley de Lenz– corrientes en un material conductor de sentido contrario a las circulantes por la bobina. Un diagrama del fenómeno se muestra en la Figura 34:



**Figura 34. Principio de calentamiento inductivo [7]**

En el calentamiento inductivo, la corriente inducida en el material conductor produce calor debido al efecto Joule. Este calor es el utilizado en los hornos industriales de inducción. El uso de hornos de inducción para fundir metales también es un tema conocido hace décadas [6] [49] . Ya en 1903 el sueco F. Kjellin construyó un horno de inducción para fusión de metales, no sin complicaciones [6] . Al pasar los años los problemas técnicos de los primeros intentos se fueron mejorando, desarrollando un horno inductivo industrial de alta frecuencia en 1918 gracias al profesor

estadounidense E. F. Northrup. La técnica se depuró, y a inicios de la década de 1930 se instaló el primer horno inductivo de media frecuencia en la ciudad de Sheffield, Inglaterra. La compañía estadounidense Ohio Crankshaft también inició en esa misma fecha la utilización de este tipo de hornos para tratamiento térmico de aceros [71] .

Actualmente, las aplicaciones industriales de calentamiento por inducción se utilizan en su mayoría en empresas metalúrgicas, aunque existen aplicaciones en otras áreas muy específicas. Las aplicaciones se pueden dividir en 5 grandes grupos:

- Tratamiento de calor (Metalurgia): templado, endurecimiento, eliminación de tensiones, etc.
- Calentamiento de masa: barras, placas, láminas, alambres, tuberías.
- Aplicaciones especiales de calentamiento: uniones, soldaduras fuertes, recocido, calentamiento de moldes, tratamiento de lanas y maderas, industria del papel, industria química, industria alimenticia.
- Fundición.
- Soldaduras de tuberías y conductos.

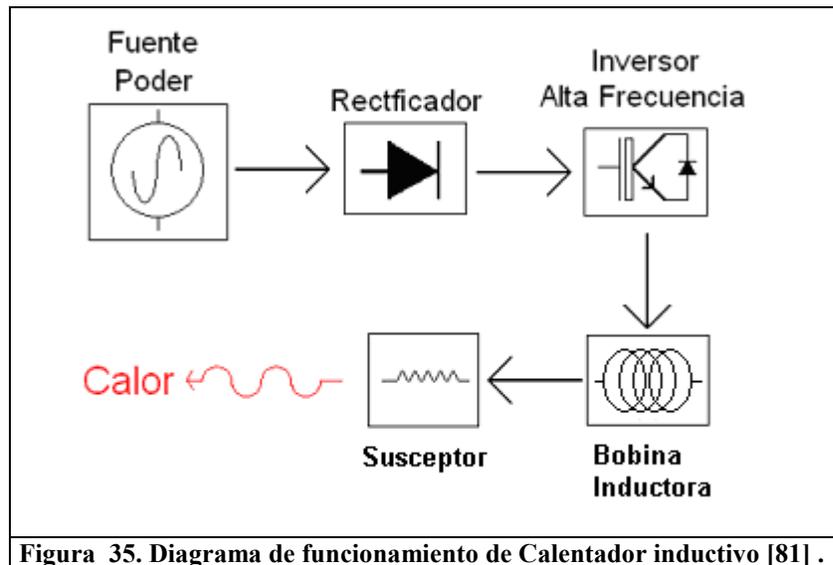
Hasta ahora, no ha habido un desarrollo importante en la aplicación de esta tecnología en el calentamiento de fluidos de pasada. El sistema de calentamiento inductivo para fluidos de pasada desarrollado en el proyecto FONDEF D05I10098 consiste en una fuente de campo electromagnético de frecuencias medias [kHz] y un susceptor magnético (medio conductor) inmerso en el fluido. Este último transforma la energía inducida de dicho campo emitido en energía calórica, la que es finalmente transferida al fluido de pasada. A continuación se describe con más detalle este tipo de tecnología.

## **4.1 Sistema de Calentamiento de Fluidos de Pasada por Inducción Magnética**

### **4.1.1 Descripción general**

El sistema consiste en un sistema eléctrico que trabaja como fuente de campo magnético, el cual se compone de: una bobina inductora, un sistema de control de la corriente (potencia) por la bobina –el cual permite maximizar la transferencia de energía y obtener un control de la temperatura del fluido –, y un susceptor magnético en el cual se inducen corrientes eléctricas producto del campo magnético que lo rodea. Las corrientes eléctricas, debido a la resistividad del material, producen calor

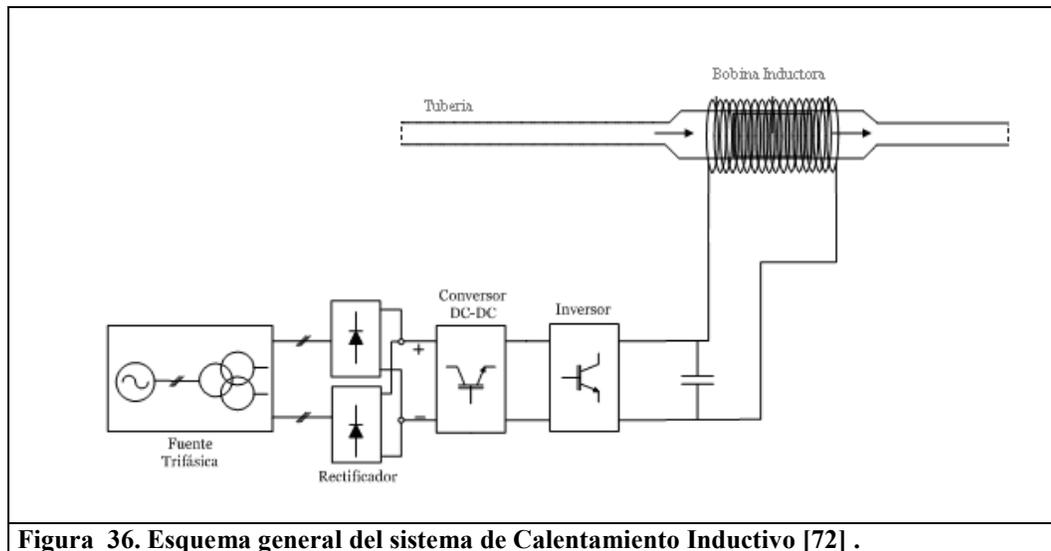
por efecto Joule. En el siguiente diagrama muestra en forma simplificada el funcionamiento general del sistema de calentamiento inductivo.



**Figura 35. Diagrama de funcionamiento de Calentador inductivo [81] .**

Una de las principales características de este tipo de calentamiento, es que permite transferir grandes volúmenes de energía en un espacio muy reducido (a través del campo magnético), y a su vez, el susceptor posee una gran superficie expuesta hacia el campo y hacia el fluido, lo que permite maximizar la inducción de corriente y diseñar elementos de alta potencia en un espacio muy pequeño.

El sistema inductivo de calentamiento posee la ventaja de que está diseñado para instalarse dentro de la tubería por donde circula el fluido. Entonces, para calentar cualquier tipo de fluido la restricción de diseño está en elegir los materiales que resistan la corrosión del fluido. La Figura 36 muestra un esquema general del sistema de calentamiento inductivo.



**Figura 36. Esquema general del sistema de Calentamiento Inductivo [72].**

## Dimensiones

Existe un prototipo semi industrial de calentamiento de fluidos de 500[kW] de potencia nominal, diseñado y construido en el marco del proyecto Fondef antes mencionado, el cual se caracteriza por:

- Un susceptor de un largo de 1,2[m], con un ancho de 18,2[cm] de diámetro exterior. Este diámetro exterior es modificable para adaptarse a las dimensiones de la tubería en donde se instale.
- Una bobina inductora de una capa, hecha de tubos de cobre recocido de 16[mm] de diámetro exterior.
- Un gabinete de control de dimensiones 2,5[m] de alto, 4[m] de largo y 1,3[m] de ancho.

Se aprecia que las dimensiones son muy reducidas considerando la potencia nominal del equipo.

El equipo de calentamiento inductivo pretende ser un sistema con unidades estándar de una potencia fija, las cuales se instalen en cascada para formar equipos de mayores potencias. Esto genera una serie de ventajas tales como:

- La mantención o reparación de los equipos no detiene el proceso de calentamiento del fluido, sólo limita la potencia entregada según los equipos que se encuentren fuera de operación.
- Por lo anterior, los procesos críticos en la industria no son interrumpidos.
- Al ser equipos estándar y modulares, es de fácil fabricación en serie.

Así, equipos de mayores potencias tendrán las dimensiones totales de los equipos en cascada utilizados. La construcción de equipos estándar también se fundamenta en que el desarrollo de

unidades de mayor potencia implica el manejo de grandes corrientes y tensiones, con problemas en la construcción de las barras, los equipos de electrónica de potencia y de refrigeración.

A continuación se describirán las componentes del sistema eléctrico, la bobina inductora y el susceptor.

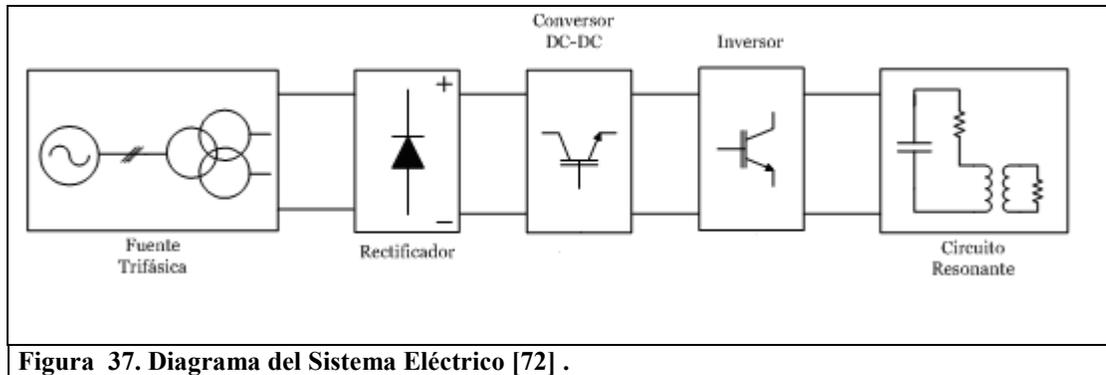
#### 4.1.2 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico del calentador inductivo es el encargado de suministrar la potencia eléctrica requerida para generar los campos magnéticos necesarios, y así transferir esa potencia al susceptor [72].

El sistema se puede dividir en 5 componentes funcionales:

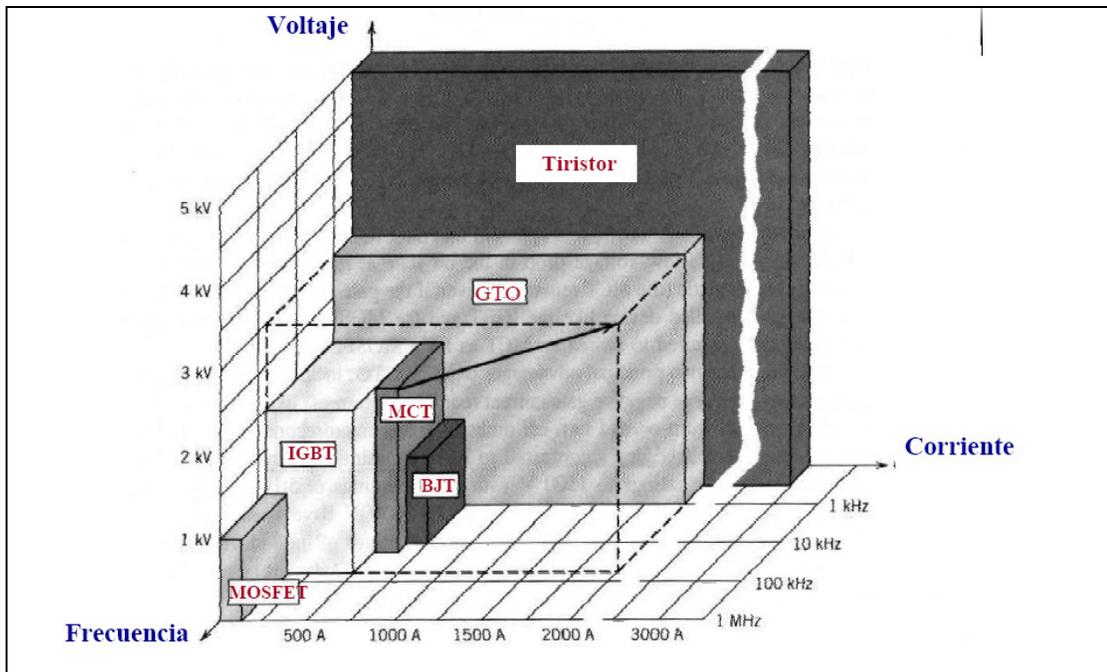
- Sistema de Alimentación Trifásico.
- Sistema de Rectificación de Tensión.
- Sistema Conversor DC-DC
- Sistema Inversor.
- Circuito Resonante.

Estas componentes se pueden apreciar en el siguiente diagrama:



El sistema en su conjunto funciona como fuente de alimentación y control. La carga eléctrica de este sistema (Circuito Resonante) está formada por los parámetros eléctricos equivalentes del susceptor, de la bobina inductora –como son la resistencia eléctrica y las inductancias propias y mutuas que las conforman– y un condensador que permite definir la frecuencia de operación del circuito. Los parámetros equivalentes mencionados forman un circuito RLC con una frecuencia de resonancia característica. El control del sistema permite que la carga trabaje a la frecuencia eléctrica resonante, lo cual deriva en una maximización de la potencia transferida [71].

Los equipos de electrónica de potencia que conforman el sistema eléctrico (etapas de rectificación, conversión DC-DC e inversión), se dimensionan dependiendo de la frecuencia resonante a la que funcionará el calentador y de la potencia transferida (corrientes y tensiones). Por ello, para cada equipo diseñado se deben utilizar equipos de electrónica de potencia especiales para el rango de operación. Actualmente los equipos de electrónica de potencia que se encuentran en el mercado están bien acotados para trabajar a una cierta potencia y en un rango de frecuencias, como se aprecia en la Figura 38.



**Figura 38. Desarrollo de equipos de electrónica de potencia. Fuente: Power Electronics. Mohan, Undeland, Robbins. Editorial Wiley-India. 2007.**

El sistema eléctrico debe ser capaz de mantener el factor de potencia cercano a uno para evitar problemas en la red de alimentación, o una posible multa por parte de la empresa de suministro eléctrico. Ello se logra con la operación a la frecuencia de resonancia del equipo, configurando los equipos de electrónica de potencia para que las potencias reactivas producidas se anulen dentro de las mismas etapas, obteniendo en la entrada al sistema un factor de potencia cercano a uno.

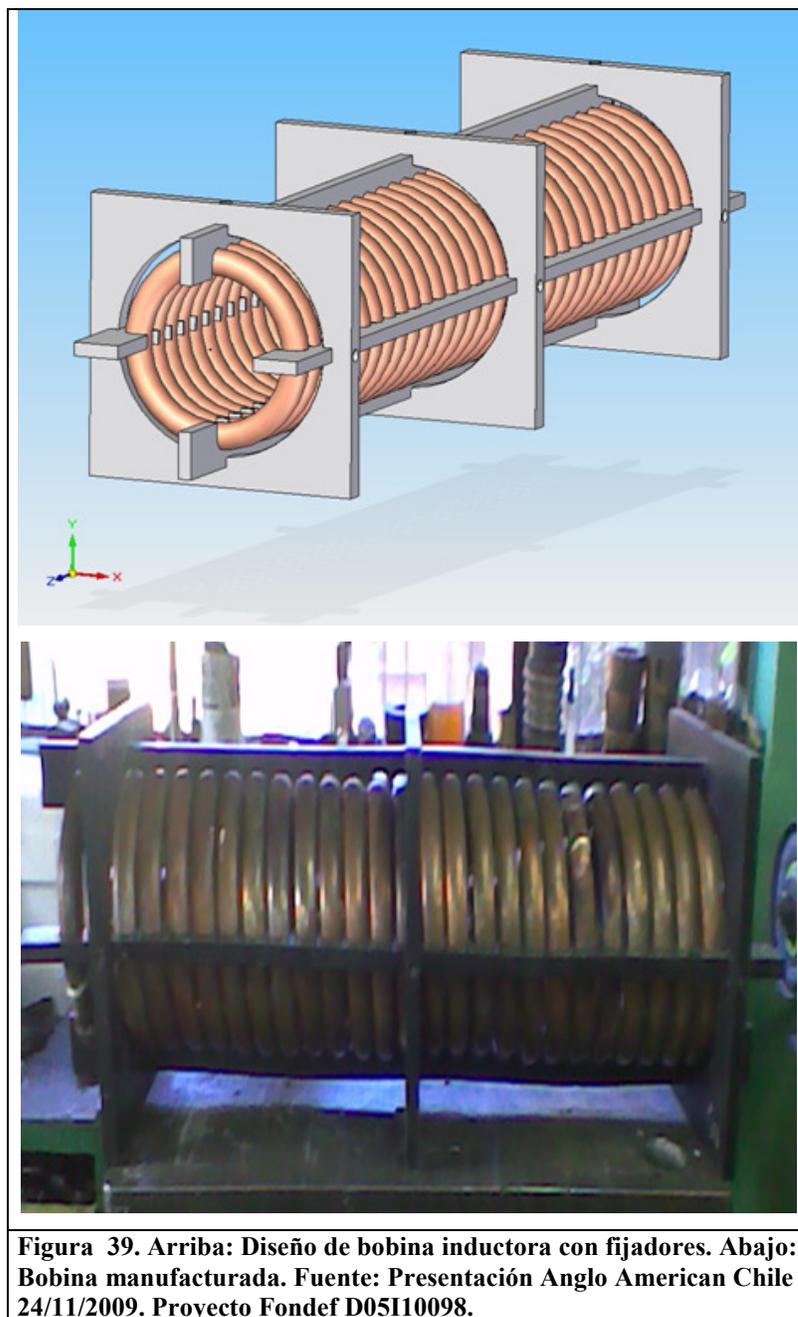
### 4.1.3 Bobina inductora

El diseño de la bobina inductora considera un comportamiento similar a un transformador en donde el secundario equivale a la carga a calentar. Así, se cumplen las relaciones entre la corriente y el número de vueltas, y además se cumple que la eficiencia del acoplamiento entre enrollados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos, por ello la bobina debe estar lo más

cerca posible del susceptor para una máxima transferencia de energía, en donde el mayor número posible de líneas de flujo sean interceptadas por el susceptor.

La bobina inductora está constituida por un conductor circular de cobre hueco de tipo recocido, por el cual pasa un flujo de agua para refrigeración de la misma. El sistema de enfriamiento de la bobina debe ser capaz de aprovechar el calor disipado, entregándolo al sistema de calentamiento (en el caso de que el flujo a calentar sea agua), aumentando la eficiencia del sistema. Las pérdidas producto del calor generado en la bobina representan un 70% de las pérdidas totales del equipo, lo que explica la importancia de reutilizar ese calor disipado. La solución para el equipo de 500[kW] es instalar un intercambiador de calor agua-agua que entregue el calor disipado por la bobina al fluido a calentar. La sección de la bobina debe tomar en cuenta la profundidad de penetración de la corriente (por tratarse de corriente alterna), y debe ser tal que distribuya la densidad de corriente de manera uniforme para evitar sobrecalentamientos. A partir de resultados experimentales se concluyó que la bobina que tiene un mejor comportamiento es la bobina de una capa, la cual maximiza el factor de aprovechamiento de energía (cuociente entre la potencia disipada por el susceptor y la potencia entregada por el inversor) y mejora la transferencia de potencia al susceptor [47] .

Para un mejor anclaje y separación de cada vuelta de la bobina, se diseñó un sistema de fijadores tipo “peine” los cuales permiten la aislación de cada vuelta y una rigidez mecánica que aumenta la robustez del sistema (Figura 39), eliminando los problemas derivados de las corrientes que circulan tanto por el susceptor como por la bobina, las cuales generan fuerzas magneto-motrices que tienden a deformar la bobina, y provocan vibraciones que pueden soltar las fijaciones o contactos eléctricos [82] .



#### 4.1.4 Susceptor

El susceptor magnético es el elemento encargado de tomar la energía proveniente del campo magnético y transformarlo en calor.

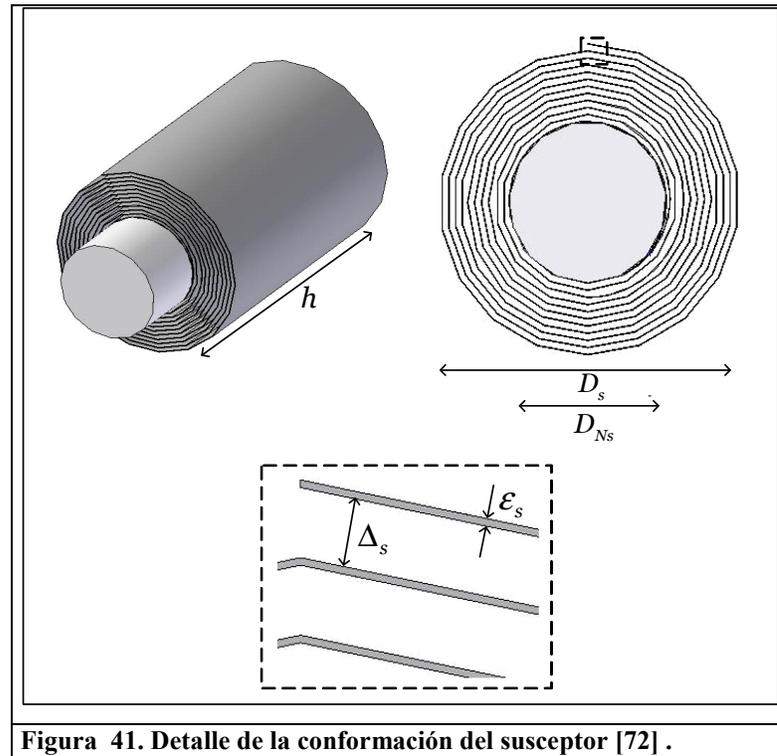
El susceptor del equipo de calentamiento inductivo desarrollado es una lámina rectangular de acero inoxidable enrollada sobre sí misma [83] , formando una geometría de tipo espiral con espacios entre sus vueltas para posibilitar el paso del fluido (Figura 40). Esta configuración se eligió dentro de

varias alternativas debido a que cumple una serie de requisitos térmicos, eléctricos y mecánicos que hacen que sea la mejor alternativa para este tipo de aplicación.



**Figura 40. Configuración del susceptor [2] .**

La ilustración de la Figura 41 muestra en detalle la configuración que posee el susceptor.



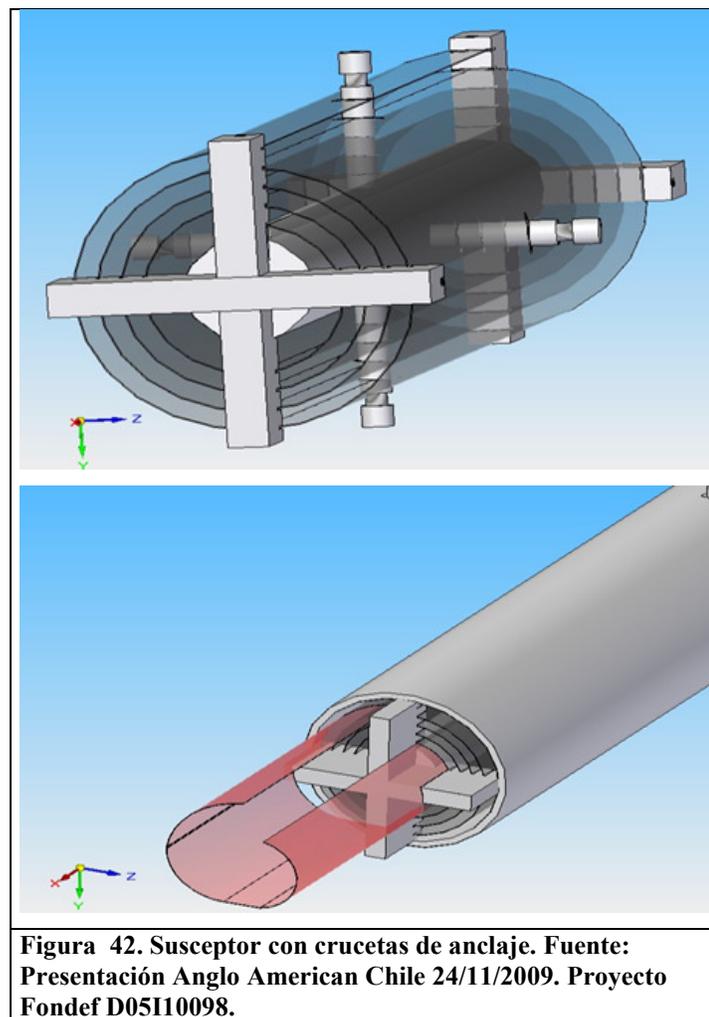
**Figura 41. Detalle de la conformación del susceptor [72] .**

Las dimensiones del susceptor magnético dependen de las restricciones de diseño que debe cumplir. El diámetro externo del susceptor  $D_s$  está determinada por el diámetro interior de la tubería en que se encuentra, y en donde la primera y última capa del mismo están unidas eléctricamente para así tener una misma densidad de corriente en todo el susceptor. La distancia entre capa y capa ( $\Delta_s$ ) debe ser tal que minimice la resistencia hidráulica al paso del flujo, permitiendo una mínima variación

de la presión dentro de la tubería. La longitud  $h$  del susceptor depende de los requerimientos de temperatura máxima que debe alcanzar el susceptor; mientras mayor es la longitud –para una misma potencia a transferir– menor es la elevación de temperatura del material. El espesor de la lámina de acero  $\epsilon_s$  es función de la capacidad para soportar las presiones hidráulicas y las fuerzas que puedan deformarlo con el paso del flujo.

Ubicado en el centro del susceptor se encuentra un tapón de baquelita el cual obliga al fluido a pasar únicamente por los flejes del espiral, provocando una uniformidad en la distribución de temperaturas en la zona de transferencia de calor, como también en la distribución de las velocidades del fluido evitando así calentamientos irregulares.

Para lograr una rigidez mecánica dentro de la tubería, el susceptor es anclado a la tubería internamente mediante una serie de crucetas, las cuales también evitan la deformación del susceptor, tal como se muestra en la Figura 42.



El susceptor y sus anclajes están diseñados para que la caída de presión sea mínima. Así, el área útil de paso de fluido debe ser de un 70% o más del área total interior del ducto. Esto asegura que la instalación del equipo de calentamiento inductivo en una línea de fluido no altere el sistema (aumento de la presión hidráulica al interior de las tuberías), no requiriendo cambios de bombas impulsoras de mayor potencia. El área de obstrucción toma en cuenta el alma de baquelita, el área de los anclajes y el área del susceptor [48] .

## **4.2 Intensidad de Campos Magnéticos en las Cercanías**

Como el equipo es fuente de campos magnéticos intensos, se realizaron estudios acerca de los posibles efectos sobre seres vivos en la operación del calentador inductivo.

Los campos magnéticos intensos son producidos por la circulación de corrientes eléctricas de gran magnitud. Ellas se pueden encontrar a la salida del Inversor (dentro del gabinete de control y alimentación eléctrica) y en la bobina inductora [68] .

Se estudió un prototipo de laboratorio de 15[kW] y se realizaron estudios teóricos para un prototipo industrial de 500[kW]. Las mediciones hechas sobre el gabinete de control demostraron que para el caso del prototipo de 15[kW] los campos se encuentran bajo los límites recomendados por normas europeas y estadounidenses (bajo  $30,7[\mu T]$ ) para público ocupacional. El estudio realizado para los campos magnéticos del gabinete para 500[kW] concluyó que los campos estarían por sobre la norma recomendada para público ocupacional. Sin embargo, estos campos magnéticos intensos no provocarían un daño permanente a la salud humana. La exposición en largos períodos causaría molestias tales como la aparición de fosfenos en la visión humana y una disminución del ritmo cardíaco en el peor de los casos. El estudio recomendó disminuir la frecuencia de switching del inversor y alejar los cables de alimentación de la bobina de las partes sensibles al ser humano, como son el nivel del corazón y cabeza [80] .

Los estudios y mediciones de campo magnético cercano a la bobina indican que para el equipo de 15[kW] los valores recomendados por las normas no son sobrepasados. Para el equipo de 500[kW] existe un alto valor de campo magnético muy cercano a la bobina (alrededor de 1[cm]) y decae de la forma  $1/r^2$ , con  $r$  la distancia radial al borde de la bobina, que lo hace seguro para todo tipo de público alejado más de 30[cm] de la bobina. Para operarios, esta distancia segura es menor.

## **4.3 Eficiencia del Equipo de Calentamiento Inductivo**

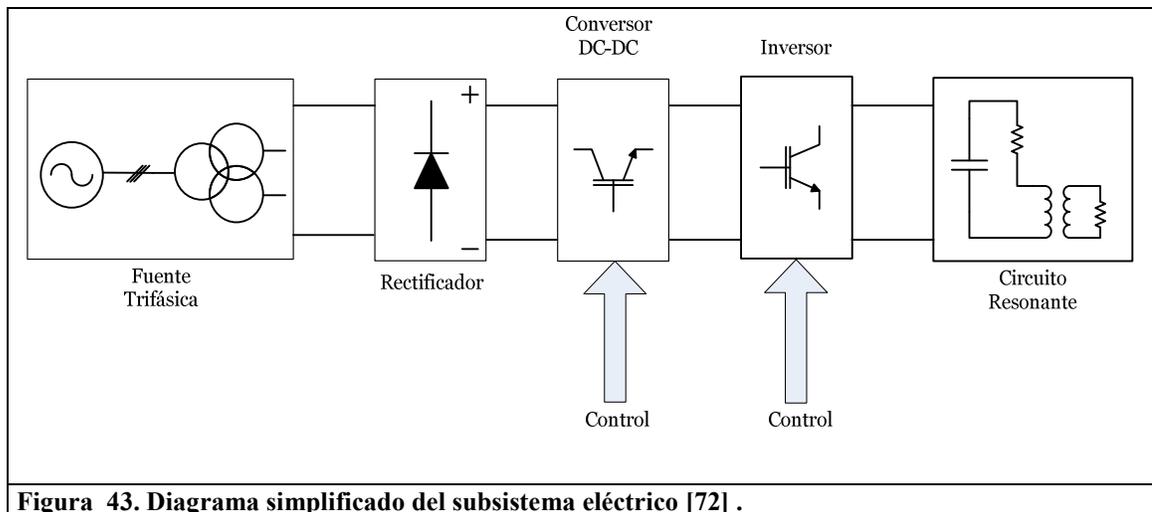
Las pérdidas que presenta el equipo inductivo son relativamente bajas, y se pueden listar como:

- Pérdidas por efecto Joule en la bobina inductora: Estas pérdidas representan casi un 70% de las pérdidas totales del equipo. El calor generado en la bobina por causa de la circulación de corriente debe ser extraído por medio de sistemas de enfriamiento [47] .
- Pérdidas en los IGBT: Por medio del switching en la operación de los equipos, se genera calor que debe ser extraído también por sistemas de refrigeración, generalmente en base a agua [74] .
- Pérdidas por radiación al ambiente: Estas son pérdidas que se producen desde la tubería en la sección donde se encuentra inmerso el susceptor, por medio de convección, hacia el medio ambiente.
- Pérdidas por semiconductores, cables de alimentación y transformadores: son de difícil recuperación, y representan un pequeño porcentaje de las pérdidas totales.

La eficiencia del equipo tiene un valor en torno al 90%, considerando sólo como pérdida importante el calor generado en la bobina inductora. Si el sistema de refrigeración de la bobina logra utilizar el calor evacuado y entregarlo al sistema de calentamiento, la eficiencia aumentaría a 93-95%. En el caso del prototipo industrial de 500[kW], el sistema de enfriamiento de la bobina utiliza el mismo circuito cerrado de agua que el sistema de enfriamiento de los IGBT, logrando los niveles de eficiencia antes mencionados [45] .

## 4.4 Equipos de Control de Potencia de Sistemas de Calentamiento Inductivo

Como se mencionó en la Sección 4.1.2 , el sistema eléctrico funciona como fuente de alimentación y control. En la Figura 43 se muestra un diagrama simplificado.



**Figura 43. Diagrama simplificado del subsistema eléctrico [72] .**

La carga eléctrica se compone de la bobina inductora junto con el susceptor, más un condensador de ajuste en paralelo, los cuales definen un circuito resonante RLC con una frecuencia característica de resonancia.

El control de la frecuencia de resonancia del circuito se realiza a través de la sincronización de los pulsos de disparo de los interruptores del inversor. El inversor se comporta como una fuente de corriente para el circuito resonante, entregando potencias reactivas a las ramas capacitivas e inductivas que están en paralelo, tal que se anulen entre ellas y se logre obtener un factor de potencia unitario a la entrada. Además, el circuito actúa como filtro para la contaminación armónica producida por los IGBT en la etapa de inversión. La potencia proviene de una fuente trifásica y se controla desde el conversor DC-DC mediante el ciclo de trabajo del chopper. Éste regula la corriente de salida del conversor, la cual actúa como fuente de corriente de alimentación. La tensión de salida del conversor DC-DC también es controlada y depende de la naturaleza de la carga.

El sistema de rectificación no posee control alguno, y lo conforma una configuración de 6 diodos. Este sistema genera distorsión armónica de corriente, disminuyendo el factor de potencia.

Sin embargo, se interconecta un transformador multipulso con rectificadores en paralelo, haciendo que la corriente de entrada sea lo más sinusoidal posible [72].

#### 4.5 Disponibilidad de los Equipos y Fallas Típicas

Las fallas que se podrían presentar en el equipo inductivo son las siguientes:

- Falla del sistema de refrigeración de la bobina inductora. En este caso, al no evacuarse el calor generado por efecto Joule en la bobina inductora de forma efectiva, se produce un aumento de la temperatura de ésta, lo que a su vez aumenta la resistencia eléctrica del cobre de la bobina inductora. Esto provoca una mayor generación de calor por el efecto Joule, provocando un círculo vicioso con mayores pérdidas en el equipo y posibles daños en la bobina.
- Cortocircuitos en la bobina inductora. Provoca que los parámetros eléctricos que ve el sistema de control de la frecuencia cambien abruptamente, sin que el sistema de control pueda reaccionar con la misma rapidez. Esto provoca sobretensiones sobre los IGBT que eventualmente podrían dañarlos o quemarlos.
- Detenciones del flujo de agua por la tubería o baja de su caudal. En este caso el sistema de control debe ser capaz de cortar la potencia entregada al susceptor, ya que la operación del equipo sin agua eleva la temperatura del susceptor muy rápidamente. En el caso de que el flujo de agua se detenga pero la tubería esté llena de agua, el sistema también debe ser capaz de apagarse, ya que en caso contrario puede existir evaporación de agua dentro de la tubería, aumentando la presión con riesgo de explosiones.

#### Mantenimiento

El mantenimiento que requiere el equipo inductivo de calentamiento es mínimo, ya que al no tener estanques de acumulación de fluido no se genera ningún tipo de depósitos o decantaciones. Además, no posee partes móviles que puedan desgastarse. La electrónica de potencia requiere un mínimo de mantención, y según la experiencia el factor disponibilidad de éstos es muy elevado.

Una de estas mantenciones mínimas es sobre el equipo de refrigeración de los IGBT. El sistema en base a agua debe inspeccionarse con una frecuencia de 4 meses aproximadamente, con una duración de 1 día [45]. Basta en muchos casos con una inspección visual a la bobina inductora, posibles filtraciones en los flanges de unión e inspección del tablero de control.

## **4.6 Costos a Considerar en el Uso de un Sistema Inductivo**

En la evaluación económica de un sistema inductivo de calentamiento, el costo de inversión es muy alto en comparación con las alternativas de calentamiento que existen en el mercado. Esto se debe a la electrónica de potencia, donde los semiconductores deben soportar tensiones y corrientes muy altas, lo que requiere de equipos robustos y especiales para la aplicación.

Por otro lado, los costos de mantención son bajísimos, comparables con los del sistema resistivo, debido a la robustez de la electrónica de potencia y además porque no hay ningún elemento móvil que se desgaste con el tiempo. La única mantención importante es al sistema de refrigeración tanto de los IGBT como de la bobina. Los costos de operación son representados casi en su totalidad por el costo del consumo de energía eléctrica, caso muy similar a los sistemas de calentamiento resistivo.

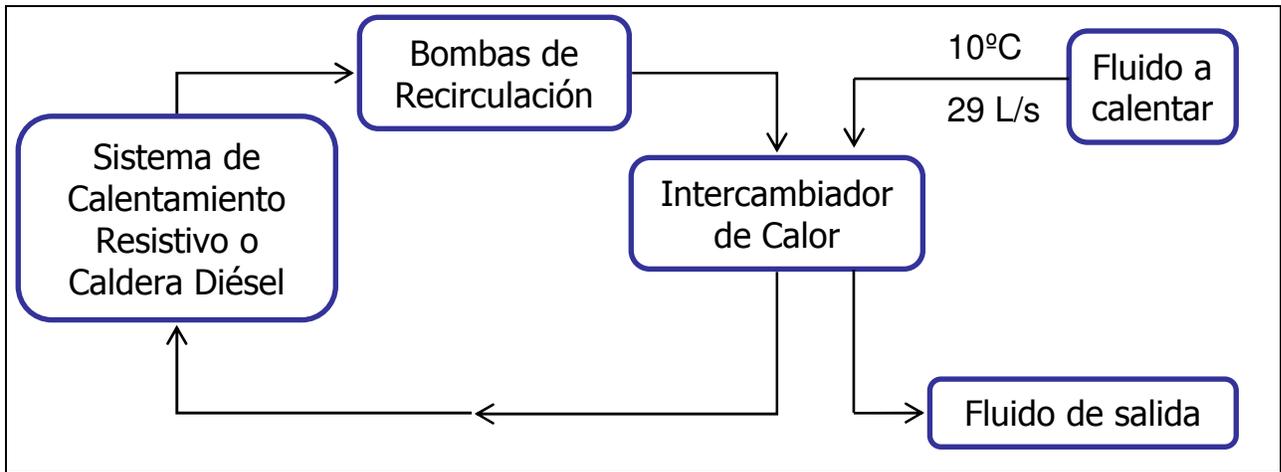
## Capítulo 5

# Estudio Comparativo Técnico-Económico de Sistemas de Calentamiento de Fluidos con Resistencias Eléctricas, Calderas Diésel e Inducción Magnética

En el siguiente capítulo se realiza una comparación técnica-económica de los tres sistemas de calentamiento de fluidos estudiados en el Capítulo 4, en base a un caso de estudio para una aplicación industrial, en particular un proceso minero, el cual se describe a continuación.

En el caso de estudio el objetivo es calentar un flujo de solución de 29[l/s] (100[m<sup>3</sup>/h]) que posee una temperatura inicial de 10°C. Para ello, se configura un sistema térmico compuesto por un ciclo cerrado de agua en donde el traspaso de calor se realiza a través de un intercambiador de calor de tipo placas. El agua en circuito cerrado se calienta por medio de calefactores de resistencias eléctricas o calderas diésel (Figura 44).

El comportamiento y las características típicas de cada sistema se estudiaron para 2 niveles de potencia: 500[kW] (nivel bajo); 1[MW] (nivel medio). Para estudios comparativos de potencias mayores (nivel alto), el comportamiento de los sistemas se puede analizar en base a estos dos casos, ya que los sistemas se componen de equipos en paralelo con niveles de potencia similares a los estudiados aquí.



**Figura 44. Sistema Resistivo/Caldera Diésel analizado para el estudio comparativo de calentamiento de agua.**

Para estas dos tecnologías de calentamiento, el circuito cerrado de agua es necesario para minimizar las mantenciones, ya que se trabaja con agua tratada con decantadores y ablandadores que impiden que se formen lodos y depósitos calcáreos, alargando notablemente la vida útil de los equipos y aumentando su disponibilidad. Los fabricantes de calentadores resistivos realizan diseños especiales para fluidos corrosivos o con mucha dureza que no requieren de circuitos de agua cerrada, pero son soluciones particulares para cada solución y más caras que el diseño estándar. La consideración de un circuito cerrado de agua le da más flexibilidad al análisis.

En el caso del sistema inductivo de calentamiento, el circuito cerrado de agua es innecesario (Figura 45) debido a que se trata de un sistema carente de estanques (no hay problemas de decantación ni depósitos), siendo mínimamente invasivo en el caso de instalaciones existentes, y muy compacto si se desea instalar para calentar fluido en un nuevo proceso. Para la comparación, se tomarán unidades de 500[kW] y 1[MW] respectivamente, y para mayores potencias el calentador de compondrá de N calentadores inductivos en cascada independientes entre sí de 500[kW]. Para estudiar casos con potencias mayores basta con extrapolar para N calentadores.



**Figura 45. Sistema inductivo analizado para el estudio comparativo calentamiento de agua**

## 5.1 Configuración de los Sistemas de Calentamiento

Los sistemas basados en resistencias y calderas se ubicaron en una planta minera ficticia localizada a 5000 m.s.n.m, en instalaciones bajo techo, con una temperatura ambiente promedio de 10°C. Con esto se desea minimizar impactos de las condiciones climáticas sobre los equipos (lluvia, nieve, polvo excesivo, etc.), ya que es muy difícil evaluar teóricamente un desgaste de los equipos por condiciones ambientales particulares. Para el caso del sistema de calentamiento inductivo es innecesaria la ubicación en una sala especial bajo techo, ya que el equipo no sufre mayores daños con la intemperie, y el sistema eléctrico se encuentra instalado dentro de un contenedor de traslado, el cual lo protege del medio ambiente.

El sistema de circuito cerrado de agua en el caso del sistema resistivo de calentamiento consiste en:

- Calentador eléctrico con resistencias de inmersión.
- Una (1) bomba de recirculación de agua (más una (1) de respaldo) de 10HP para 30[m<sup>3</sup>/h].
- Un (1) intercambiador de calor de tipo Placas.
- Piping y válvulas necesarias.

Los principales elementos del circuito cerrado de agua en el caso del sistema de calderas diésel consiste en:

- Caldera diésel y Quemador.
- Chimenea 400mm de diámetro.
- Un (1) estanque diésel, en acero A37-24ES.
- Un (1) tablero eléctrico NEMA 12.
- Estanque de expansión de agua de 200L, en acero A37-24ES.
- Una (1) bomba de recirculación de agua (más una (1) de respaldo) de 10HP para 30[m<sup>3</sup>/h].
- Un (1) intercambiador de calor de tipo Placas.
- Piping y válvulas necesarias.

El sistema de calentamiento inductivo consiste en:

- Fuente de Alimentación – Bobina – Susceptor – Tablero de control y electrónica de potencia.

El flujo del circuito cerrado de agua se estableció en 8,3 [l/s] (30 [m<sup>3</sup>/h]). Este valor define la capacidad de las bombas de agua, y las características del intercambiador de calor (cantidad de placas, materiales y dimensiones).

### 5.1.1 Eficiencia de los equipos

La eficiencia de los equipos se tomó en cuenta para efectos del consumo energético (tanto de electricidad como de diésel).

La metodología para conocer el consumo energético consistió en establecer un valor de eficiencia para cada equipo, con los cuales se calcula una eficiencia global del sistema (considerando todos los equipos en serie y paralelo, según corresponda). La eficiencia global así calculada se asignó al equipo calentador, y se reasignó un valor 1 (o 100%) a todos los restantes equipos. Así, para obtener la transferencia de una cierta potencia fija al fluido que se quiere calentar, el calentador entrega el consumo necesario e incorpora además todas las pérdidas en el sistema.

A continuación se muestran las eficiencias consideradas para el consumo energético:

**Tabla 17. Eficiencias energéticas de equipos de calentamiento.**

Elemento	Eficiencia
<b>Calentador eléctrico con resistencias.</b>	95%
<b>Caldera Diésel</b>	85%
<b>Bombas Diésel</b>	90%
<b>Calefacción Diésel</b>	95%
<b>Bombas de agua</b>	90% eléctrico 99% térmico

Para el caso de la caldera, tal como se explicó en la sección 3.3, las principales pérdidas son causadas por las pérdidas en los gases secos de escape, por producción de vapor de agua en la combustión, y por radiación y convección. Los valores estimados de estas pérdidas son de 7%, 6% y 2% respectivamente (suponiendo exceso de aire de 1,2, tal como se explica en la sección 3.3.2).

Se considera que existe una pérdida de calor desde el agua hacia el ambiente por el hecho de pasar por la bomba hidráulica. Esta pérdida se estimó en un 1%. Además, la bomba posee una eficiencia en su función principal de un 90% según fabricantes [25] .

Para calcular la eficiencia global del sistema, también se debe considerar que existen pérdidas de calor en los elementos que conforman el circuito cerrado de agua. Por ello se consideran los

siguientes valores porcentuales de pérdidas de calor en el estanque de expansión de agua, las bombas (ya mencionadas anteriormente), y pérdidas en el intercambiador de calor:

**Tabla 18. Pérdidas de calor considerados en elementos de sistema cerrado de agua.**

Elemento	Pérdidas de calor
<b>Estanque Expansión Agua</b>	2%
<b>Bombas de agua</b>	1%
<b>Intercambiador de calor</b>	3%

Además, se consideran las pérdidas de calor en la tubería. Si se toma en cuenta una tubería de acero, las pérdidas dependen del diámetro de la tubería, y con mayor importancia del largo. Para tuberías cercanas a los 15[cm] de diámetro, las pérdidas máximas son de 0,6% de la potencia entregada por el calefactor por cada 10 metros de largo. Para tuberías cercanas a los 50[cm] de diámetro, las pérdidas máximas llegan a los 2,2% por cada 10 metros de largo. Si las tuberías se aíslan con espuma de poliuretano, las pérdidas disminuyen a la mitad en todos los casos. Más detalles se muestran en el Anexo C, donde se calculan teóricamente estas pérdidas de calor.

### 5.1.2 Eficiencia global del sistema

Para determinar la eficiencia global del sistema de calentamiento, se deben multiplicar las eficiencias de los diferentes equipos que lo conforman, tanto para el sistema resistivo como para el sistema con calderas diésel.

Para las pérdidas de calor en la tubería se supondrá de acero sin aislación térmica, de un diámetro de 15[cm] y un largo total aproximado de 30[m] (estimado, en base a las dimensiones de los equipos del sistema de circuito cerrado de agua), que considera los codos y tramos rectos. Para esta configuración, las pérdidas de calor en la tubería se calculan en un 2%, por lo que su “eficiencia térmica” se estima en un 98%. Este último valor se utiliza junto con los valores de la Tabla 17 para el cálculo de la eficiencia global.

Para la eficiencia térmica del sistema Resistivo (pérdidas de calor en el sistema), se tiene:

- Calentador eléctrico con resistencias de inmersión.
- Tuberías de acero
- Bomba de recirculación
- Intercambiador de calor tipo Placas

- **Eficiencia Térmica Global: 89%**

Para la eficiencia térmica del sistema con Calderas Diésel, se tiene:

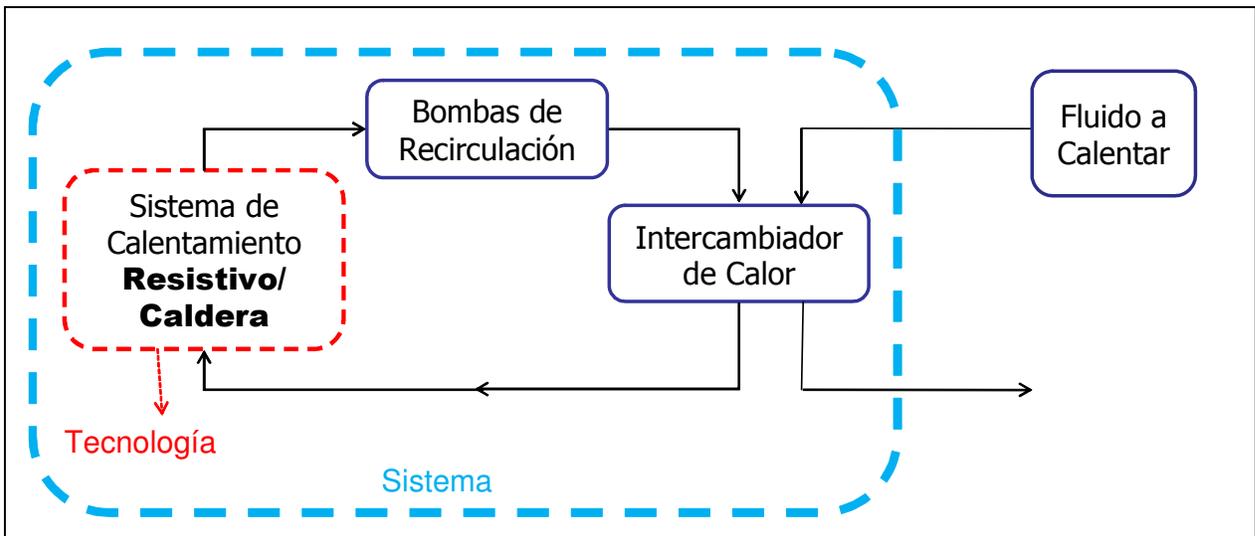
- Caldera diésel
- Estanque expansión de agua
- Bombas de recirculación
- Tuberías de acero
- Intercambiador de calor tipo Placas
- **Eficiencia Térmica Global: 78%**

En el consumo de energía, también se considera el consumo eléctrico de la bomba de agua, consumo eléctrico de la bomba de diésel, y calefacción de diésel.

La **Eficiencia Térmica** del sistema de calentamiento inductivo es de un **92%**, de acuerdo a lo revisado en la Sección 4.3, y en base a simulaciones válidas experimentalmente a potencias bajas.

### 5.1.3 Costos de inversión

Para los costos de inversión se tomaron precios promedio de distintas cotizaciones realizadas – tanto en Chile como en el extranjero– con las mismas características técnicas cada una, y pretenden establecer un costo de referencia para la comparación. Las cotizaciones se pueden consultar en el CD anexo a esta Tesis. Para definir nomenclatura, se diferencia la inversión en *Tecnología* que representa el equipo que calienta en agua, y la inversión en *Sistema* que incluye la tecnología y los sistemas anexos, como bombas, piping, intercambiadores de calor, válvulas y otros. Un diagrama simplificado de configuración del sistema de calentamiento resistivo y con caldera diésel y las definiciones antes mencionadas se muestra en la Figura 46.



**Figura 46. Diagrama simplificado de configuración de los sistemas de calentamiento resistivo y caldera diésel.**

A continuación se muestra el listado de equipos con sus respectivos costos promedio, en valores netos y dólares estadounidenses.

Costo de equipos del sistema resistivo:

**Tabla 19. Costos en USD del sistema resistivo de calentamiento según cotizaciones.**

Nº	Equipo	Costo USD
R-01	Calentador eléctrico 500[kW] y control	\$ 42.000
R-02	Intercambiador de calor tipo Placas 500.000 [kcal/h]	\$ 2.590
R-03	Calentador eléctrico 1000[kW] y control	\$ 56.907
R-04	Intercambiador de calor tipo Placas 900.000 [kcal/h]	\$ 3.600
R-05	(2) Bombas de agua de recirculación 10[HP], 30[m <sup>3</sup> /h]	\$ 7.123
R-06	Piping y válvulas necesarias	\$ 7.200
R-07	Instalación y montaje	\$ 8.000

Costo de equipos del sistema con calderas diésel:

**Tabla 20. Costos en USD del sistema con calderas diésel de calentamiento según cotizaciones.**

Nº	Equipo	Costo USD
C-01	Caldera diésel 500[kW] y quemador	\$ 22.700
C-02	Chimenea 6[m] alto 400[mm] diámetro, acero	\$ 1.100
C-03	Tablero eléctrico NEMA 12 control	\$ 4.500
C-04	Estanque diésel 500L 4[mm] acero A37-24ES	\$ 1.518
C-05	Estanque de expansión de agua 200[L] acero A37-24ES	\$ 1.589
C-06	Intercambiador de calor tipo Placas 500.000 [kcal/h]	\$ 2.590
C-07	Caldera diésel 1000[kW] y quemador	\$ 30.765
C-08	Chimenea 6[m] alto 450[mm] diámetro, acero	\$ 1.500

N°	Equipo	Costo USD
<b>C-09</b>	Tablero eléctrico NEMA 12 control	\$ 6.250
<b>C-10</b>	Estanque diésel 2000[L] 4[mm] acero A37-24ES	\$ 4.642
<b>C-11</b>	Estanque de expansión de agua 500[L] acero A37-24ES	\$ 2.232
<b>C-12</b>	Intercambiador de calor tipo Placas 900.000 [kcal/h]	\$ 3.600
<b>C-13</b>	(2) Bombas de agua de recirculación 10[HP], 30[m <sup>3</sup> /h]	\$ 7.123
<b>C-14</b>	Piping y válvulas necesarias	\$ 9.000
<b>C-15</b>	Instalación y montaje	\$ 8.000

Costo de equipos del sistema inductivo:

**Tabla 21. Costos en USD del sistema inductivo de calentamiento según cotizaciones.**

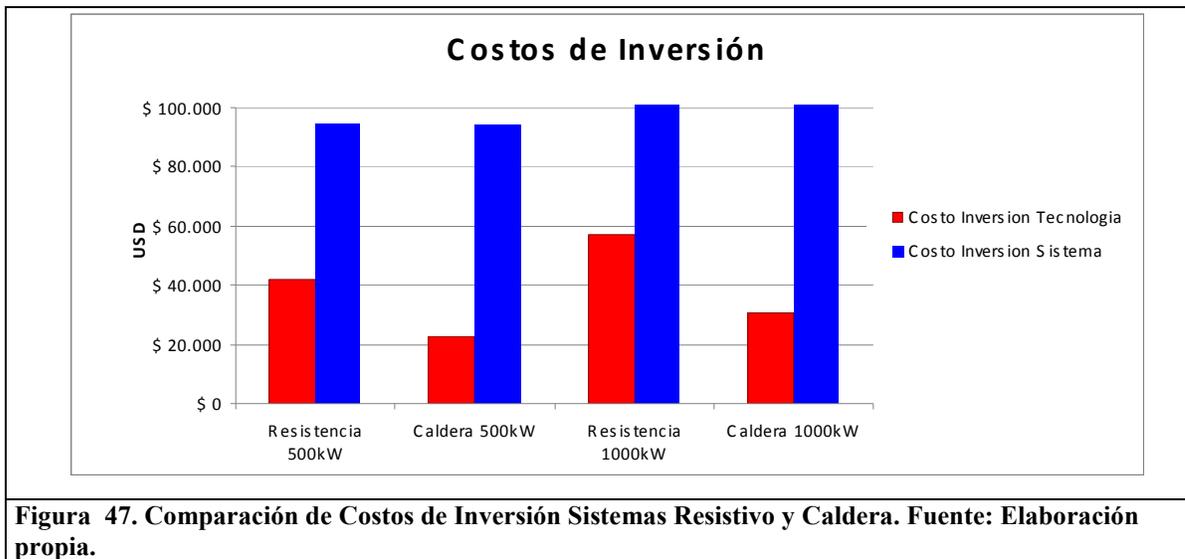
N°	Equipo	Costo USD
<b>I-01</b>	Calentador Inductivo 500[kW] y control	\$ 400.000
<b>I-02</b>	Calentador Inductivo 1000[kW] y control	\$ 650.000

Como se mencionó anteriormente, estos equipos deben estar protegidos frente al medio ambiente, por lo que se debe diseñar una sala para contenerlos. En el caso particular del sistema con calderas diésel, el Decreto N°48 “Reglamento de calderas y generadores de vapor” del Ministerio de Salud de Chile, determina que las calderas deben estar dentro de salas especiales (Artículo 9°). Según estimaciones [46] [63], el valor del metro cuadrado para una sala de calderas con requerimientos especiales de seguridad es de 160[USD/m<sup>2</sup>]. Para una sala común, como las requeridas por las calderas eléctricas, el costo estimado es de 125[USD/m<sup>2</sup>]. Si se toma en cuenta una sala de calderas de 225[m<sup>2</sup>] para la instalación de todo el sistema, la inversión para el caso de la sala especial asciende a \$36.000 USD, y para el caso de una sala común de \$28.125 USD. Para el caso del sistema con calentamiento inductivo no se toma en cuenta esta inversión ya que no es necesaria.

El total para cada sistema se muestra a continuación en la Tabla 22:

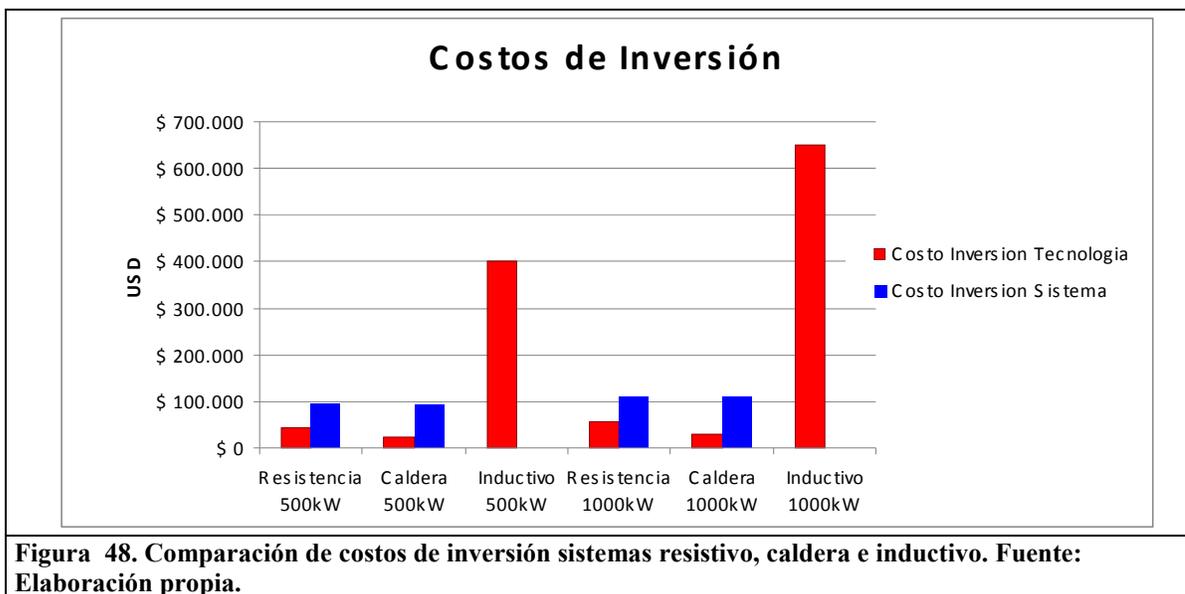
**Tabla 22. Costo Total para cada sistema de calentamiento, según potencia nominal.**

Sistema	Ítems	Total USD
<b>Resistivo 500kW</b>	R-01, R-02, R-05 al R-07	\$ 95.038
<b>Resistivo 1000kW</b>	R-03, R-04, R-05 al R-07	\$ 110.955
<b>Caldera Diésel 500kW</b>	C-01 al C-06, C-13 al C-15	\$ 94.120
<b>Caldera Diésel 1000kW</b>	C-07 al C-12, C-13 al C-15	\$ 109.112
<b>Inductivo 500kW</b>	I-01	\$ 400.000
<b>Inductivo 1000kW</b>	I-02	\$ 650.000



La Figura 47 muestra el gráfico de los costos de inversión para los sistemas resistivos y caldera diésel. Se puede apreciar que la inversión para cada sistema (azul) no difiere mucho para el mismo nivel de potencia, a pesar de la notoria diferencia de inversión para cada tecnología (rojo). Esto se explica debido a que la caldera diésel es barata individualmente, pero requiere de una serie de elementos anexos que encarecen su inversión y que finalmente equiparan el costo del sistema en comparación con el sistema resistivo. Como ejemplo, en los sistemas de 500[kW] la caldera diésel junto con el quemador representan el 24% de la inversión total, mientras que la sala de calderas representa un 38%. En cambio en el sistema resistivo de 500kW, el calentador eléctrico con resistencias representa un 44% de la inversión total y la sala un 29%.

La Figura 48 muestra el gráfico de los costos de inversión para los 3 sistemas estudiados.



El sistema inductivo tiene una alta inversión inicial comparativamente, siendo 4 a 6 veces mayor que las alternativas, a pesar de no requerir ningún elemento extra para configurar el sistema. Esto se explica por los valores de mercado de la electrónica de potencia que posee el calentador inductivo, que para los niveles de potencia requeridos son muy altos en la actualidad.

#### 5.1.4 Costos de operación anual

En la determinación de los costos de operación de cada alternativa se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Caso resistivo:
  - Consumo de energía eléctrica de las resistencias.
  - Consumo de energía eléctrica de la bomba de recirculación de agua.
  - Mantenimiento anual. (0,1 USD/MWh)[4]
- Caso caldera diésel:
  - Consumo de diésel en la caldera.
  - Consumo de energía eléctrica de la bomba de agua.
  - Consumo de energía eléctrica de la bomba de diésel.
  - Consumo de electricidad para calefacción de diésel.
  - Transporte de diésel.
  - Mantención anual. (0,889 USD/MWh)[44]
  - Operadores 24/7.
- Caso Inductivo:
  - Consumo de energía eléctrica del calentador inductivo.
  - Mantenimiento anual. (0,23 USD/MWh)[81]

Conforme a lo explicitado anteriormente, la eficiencia energética del sistema se asigna al calentador, dejando los demás equipos como ideales (sin pérdidas).

El precio de la energía eléctrica se estableció igual al Precio Medio Libre<sup>1</sup> (de mercado) publicado por la CNE en Junio del año 2009, que fue de 57,844[\$/kWh] (pesos). El precio del litro de diésel se estableció como el promedio del año 2009 según los precios de paridad entregados por ENAP al 8

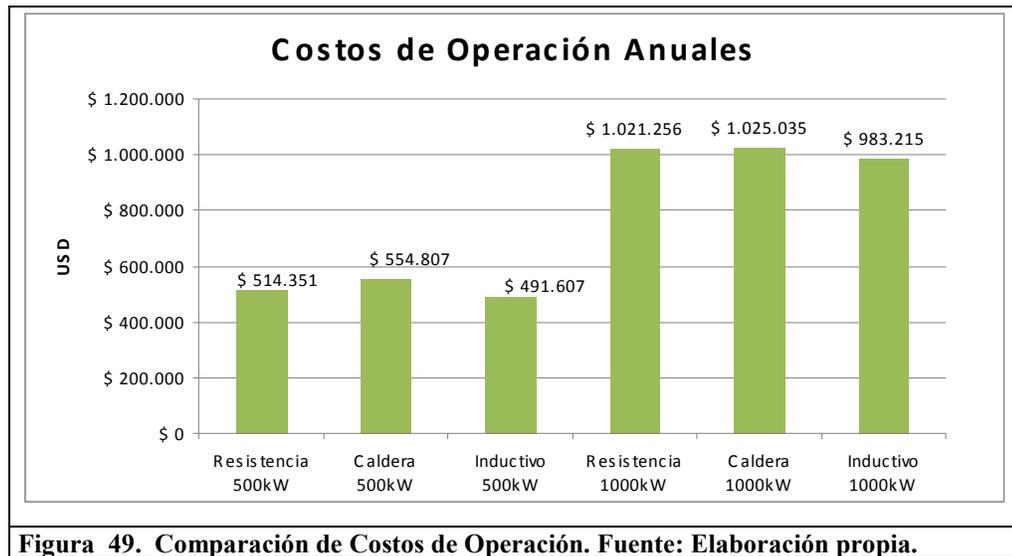
---

<sup>1</sup> Corresponde al promedio de los contratos informados por las empresas generadoras a la CNE, correspondientes a una ventana de cuatro meses. Se actualiza el primer día hábil de cada mes.

de octubre del año 2009, que es de 455[\$/litro] (pesos). Para el tipo de cambio, se estableció un valor de 560 [\$/USD].

Por norma chilena [64] , las calderas diésel siempre deben tener un operador, aunque el sistema posea automatismos. El costo de los operadores se estableció en \$41.786 USD anual, considerando 3 turnos para las 24 horas. Los detalles de los costos de operación para los tres sistemas y ambas potencias se encuentran en el Anexo B.

A continuación en la Figura 49 se muestran los costos totales anuales de operación para los 4 casos estudiados.



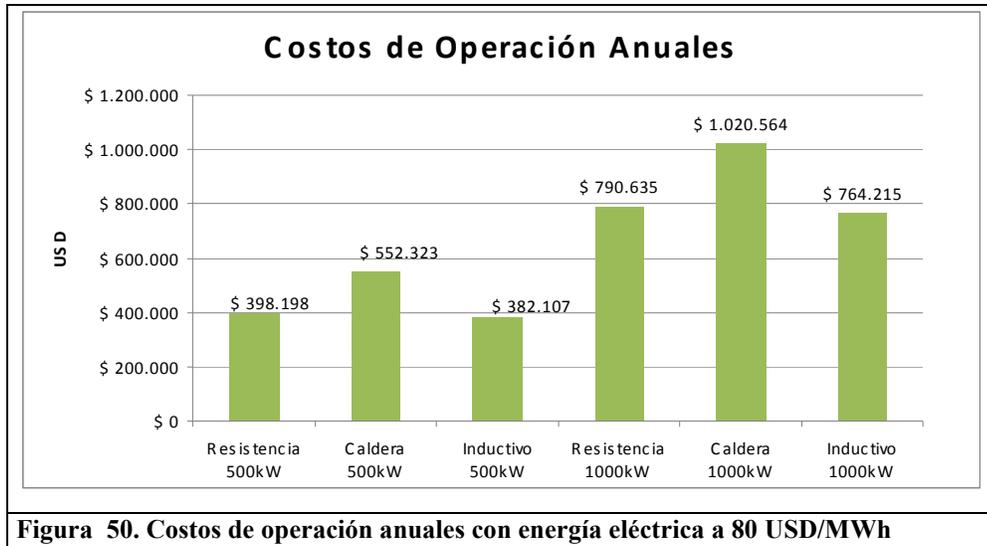
De la Figura 49 se aprecia que los costos de operación anual dado los niveles de precios establecidos no difieren de manera importante. Este comportamiento se explica por 2 factores:

1.- Los costos del consumo de diésel en el sistema con calderas representan entre un 85% y un 90% del costo total operacional para los dos niveles de potencia. En cambio el consumo de energía eléctrica por parte del sistema resistivo e inductivo representa casi el 99% del costo operacional. Luego, los costos operacionales son comparables al consumo energético (ya sea eléctrico o de combustible).

2.- Para los niveles de potencia ocupados en este estudio, el costo de la energía de origen eléctrico es mayor que el costo de la energía proveniente del diésel (10,33[¢USD/kWh] frente a 8,10[¢USD/kWh], respectivamente). Esto se basa en que el poder calorífico del diésel común es de 42.500[kJ/kg] y su densidad es de 0,85[kg/litro]. Multiplicando ambos factores, se obtiene que la energía contenida en el diésel es 36.125[kJ/litro], o bien 10,035[kWh/litro]. El precio del diésel es de 0,8125[USD/litro], con lo que se obtiene la diferencia antes mencionada.

Ambos factores explican que el costo operacional de los sistemas eléctricos se acerque al costo del sistema con calderas diésel a medida que se acercan a 1[MW] de potencia. Para grandes potencias el costo operacional se compone principalmente del consumo energético, siendo más barato el diésel.

Suponiendo un precio de la energía eléctrica más bajo, por ejemplo de 80[USD/MWh] (8[cUSD/kWh]) las ventajas de los sistemas eléctricos en costos es importante a todo nivel de potencia. De modo que si el precio de la energía eléctrica está cercano a este valor, conviene mucho más la alternativa eléctrica, tal como se aprecia en la Figura 50.



**Figura 50. Costos de operación anuales con energía eléctrica a 80 USD/MWh**

### 5.1.5 VAN de costos

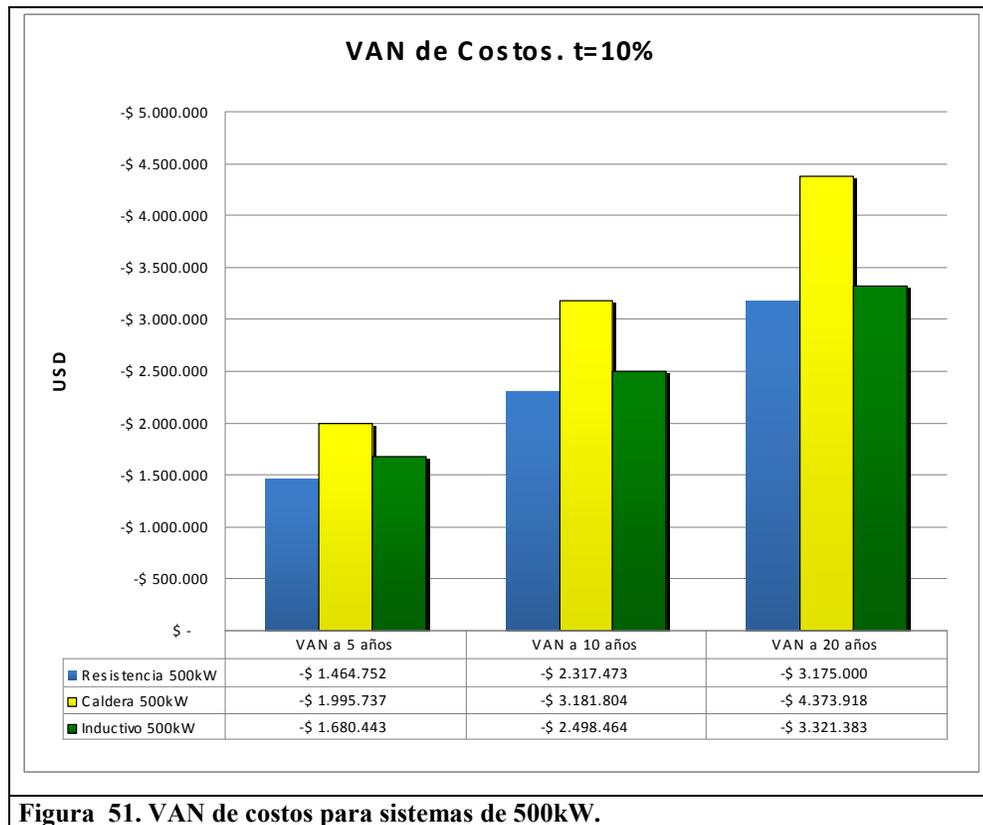
Se realizó una actualización de los costos de inversión y operación a 5, 10 y 20 años para analizar el comportamiento en el mediano plazo de cada uno de los sistemas de calentamiento estudiados.

Para el análisis se estableció un precio de la energía eléctrica constante para todo el período de evaluación. El valor establecido fue 80[USD/MWh], similar al precio de nudo promedio ponderado de los pronósticos hechos por la CNE hasta el año 2013 y publicado en el informe de precio nudo de Abril del 2009, tanto para el Sistema Interconectado Central SIC [33] como para el Sistema Interconectado del Norte Grande SING [34]. Este precio, menor al utilizado anteriormente, desea representar un precio de la energía eléctrica de largo plazo. El valor del combustible diésel se mantuvo constante en 455[\$/litro], y no se modificó como en el caso del precio de la energía eléctrica, debido a la complejidad en determinar su comportamiento a largo plazo.

Los costos operacionales consideran la misma información que la presentada en la Sección 5.1.4.

La tasa de descuento  $t$  se estableció en 10% anual, y que es comúnmente usada en este tipo de evaluaciones económicas. Además, se estableció una depreciación lineal de 3 años para toda la inversión, en los tres casos a comparar. La vida útil de las calderas se estableció en 5 años, mientras que los sistemas eléctricos se establecieron en 10 años como valores típicos utilizados en la industria.

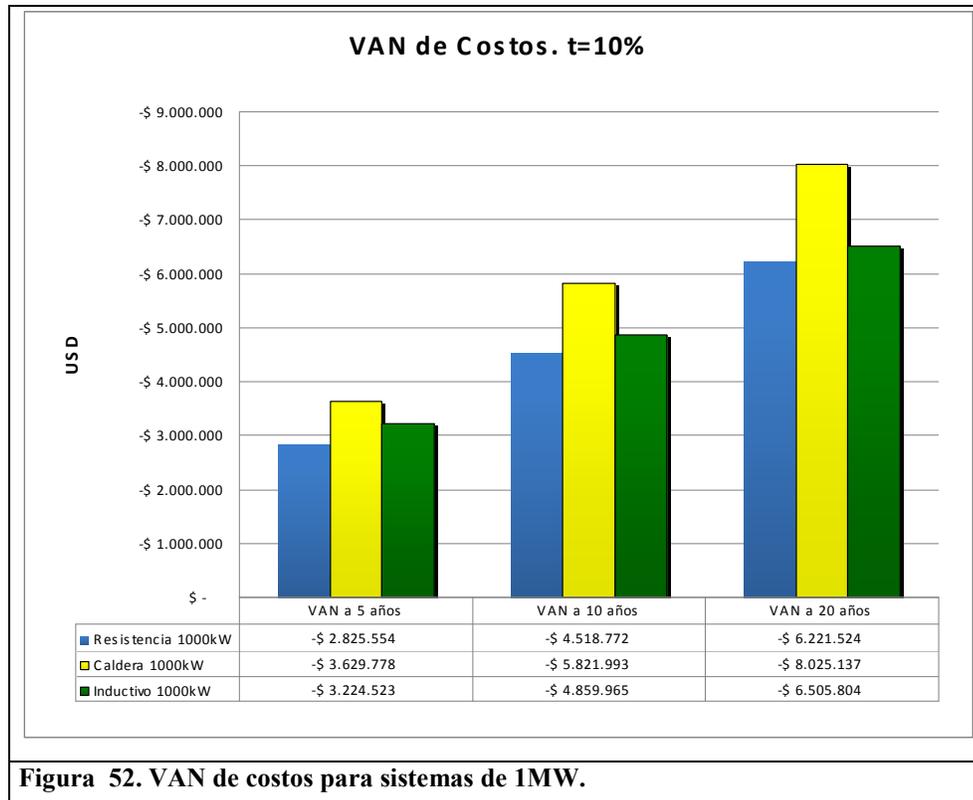
A continuación se presentan los resultados para los equipos de 500kW actualizados según un horizonte de evaluación de 5, 10 y 20 años respectivamente.



De la Figura 51 cabe destacar la gran diferencia de costos entre los sistemas eléctricos y el sistema con calderas diésel. Esto se debe a los mayores costos operativos que posee esta última y además su vida útil menor, que obliga a renovar las calderas cada 5 años. En cambio en los sistemas eléctricos sólo cambian una parte de ellos (los elementos tubulares en el caso de las resistencias eléctricas y el susceptor en el caso del sistema inductivo) manteniendo los costos anuales bajos.

El sistema resistivo es el más conveniente en cualquier horizonte de evaluación. Esto se explica por el bajo costo de mantención que posee –sumado a lo dicho anteriormente con respecto a su vida útil– y que además presenta un costo de inversión inicial 4 veces menor al sistema inductivo. Esto muestra que la mayor eficiencia del sistema inductivo (92% frente a un 89% del sistema resistivo) no es suficientemente alta como para contrarrestar en el largo plazo la alta inversión que demanda.

A continuación se muestra el mismo ejercicio para equipos de 1[MW] de potencia.



Para 1[MW] la solución de calentamiento con el sistema resistivo sigue siendo la más económica, tal como lo muestra la Figura 52, siguiendo la misma tendencia que para el caso de los equipos de 500[kW], a pesar de que las inversiones y mantenciones no siguen una tendencia clara. Los costos del sistema con calderas se escapan de los costos de los sistemas eléctricos a medida que aumenta en años el horizonte de evaluación, debido al mismo comportamiento de la vida útil y las mantenciones observado en el caso anterior.

Analizando ambas potencias, los sistemas eléctricos se comportan de manera similar, independiente de los años de evaluación o de la potencia, siendo la alternativa resistiva la más económica. La alternativa del sistema con calderas diésel se vuelve menos conveniente por el hecho de su menor tiempo de vida útil y su mayor costo en el sistema completo.

## 5.2 Sistemas Configurados para Procesos Críticos

La situación recién expuesta cambia radicalmente si este sistema de calentamiento es un proceso crítico en la industria, es decir, el cual no puede detenerse, como es el caso del calentamiento de fluidos para biolixiviación y electro-obtención en una planta minera.

Para este tipo de procesos es habitual hablar de sistemas con criterio de seguridad n-1, el cual corresponde a un criterio de seguridad para una simple contingencia. El criterio establece que los equipos que tienen una probabilidad de fallar dada (por sobre un máximo), se deben duplicar para aumentar la disponibilidad del proceso, operando los equipos a la mitad de su capacidad nominal (o máxima según el criterio económico).

A continuación se realiza el análisis de costos de inversión y operación para un sistema con criterio de seguridad n-1.

### 5.2.1 Eficiencia global del sistema

Ya que se tienen equipos duplicados operando a la mitad de su capacidad, se debe tomar en cuenta que la eficiencia de los equipos cambia.

Tomando los mismos valores de eficiencia definidos en la Sección 5.1.1 , se tiene en el sistema resistivo:

- Calentador eléctrico con resistencias de inmersión (duplicada)
- Tuberías acero
- Bomba de recirculación (antes ya duplicada)
- Intercambiador de calor tipo Placas (duplicada)
- **Eficiencia Térmica Global: 82%**

Para la eficiencia térmica del sistema con calderas diésel, se tiene:

- Caldera diésel (duplicada)
- Estanque expansión de agua (duplicada)
- Bombas de recirculación (antes ya duplicada)
- Tuberías de acero
- Intercambiador de calor tipo Placas (duplicada)
- **Eficiencia Térmica Global: 70%**

La Eficiencia Térmica del sistema de calentamiento inductivo es de un 92%, que corresponde a la misma eficiencia del equipo. Este sistema no se duplicó, por el hecho de que la disponibilidad del sistema es muy alta (y además los equipos de mediana y alta potencia se componen de equipos inductivos en cascada que no detienen el sistema a calentar, sino que sólo disminuye su capacidad de calentamiento al fallar uno de los equipos en cascada). Esto se fundamenta en el hecho de que el

sistema no posee partes móviles, los metales permanecen relativamente fríos, y la electrónica de potencia asociada al equipo sufre muy poco desgaste con el tiempo.

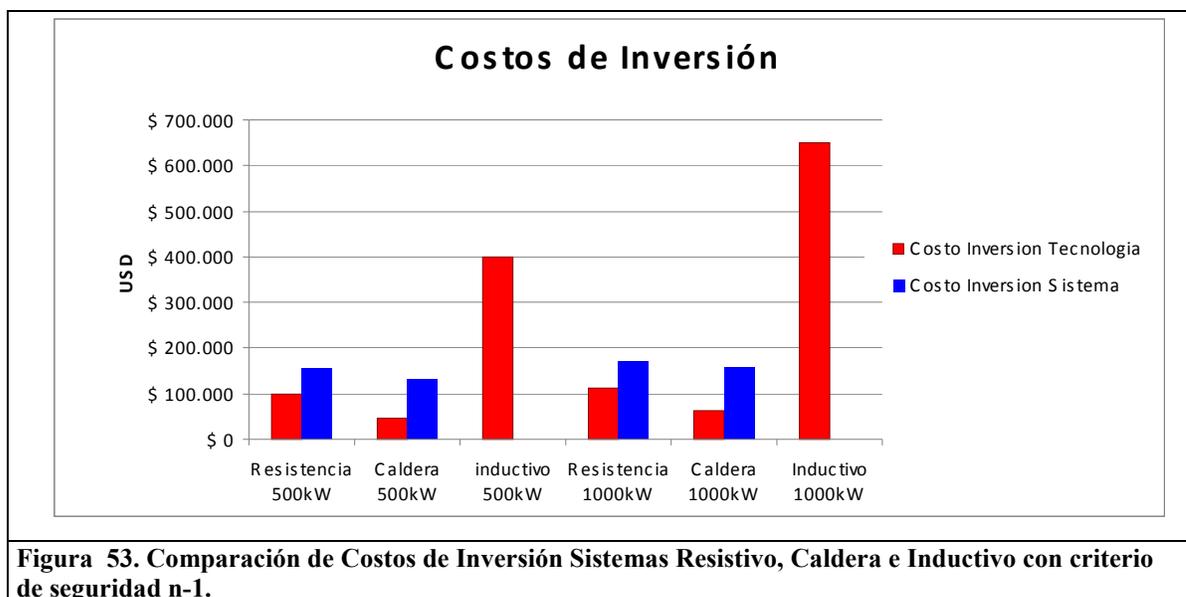
### 5.2.2 Costos de inversión

Para el cálculo de los costos de inversión de cada sistema, se tomaron los mismos niveles de precios de las Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21, duplicando el costo que corresponda. Con respecto a la sala de calderas, se tomó el mismo valor que para la primera configuración, debido a que las dimensiones permiten el emplazamiento de los equipos duplicados. Los costos en tuberías y válvulas se aumentaron en un factor 1,2 para el caso resistivo, y 1,5 en el caso de calderas diésel (debido a que se estimó que la duplicación de una caldera diésel requiere de mayores sistemas de tuberías y válvulas).

A continuación en la Tabla 23 se muestran los costos de inversión de los sistemas con criterio n-1.

**Tabla 23. Costos Totales de inversión de sistemas. Caso con criterio de seguridad n-1.**

Sistema	Total USD
Resistivo 500kW	\$154.638
Resistivo 1000kW	\$172.902
Caldera Diésel 500kW	\$131.028
Caldera Diésel 1000kW	\$159.726
Inductivo 500kW	\$400.000
Inductivo 1000kW	\$650.000



**Figura 53. Comparación de Costos de Inversión Sistemas Resistivo, Caldera e Inductivo con criterio de seguridad n-1.**

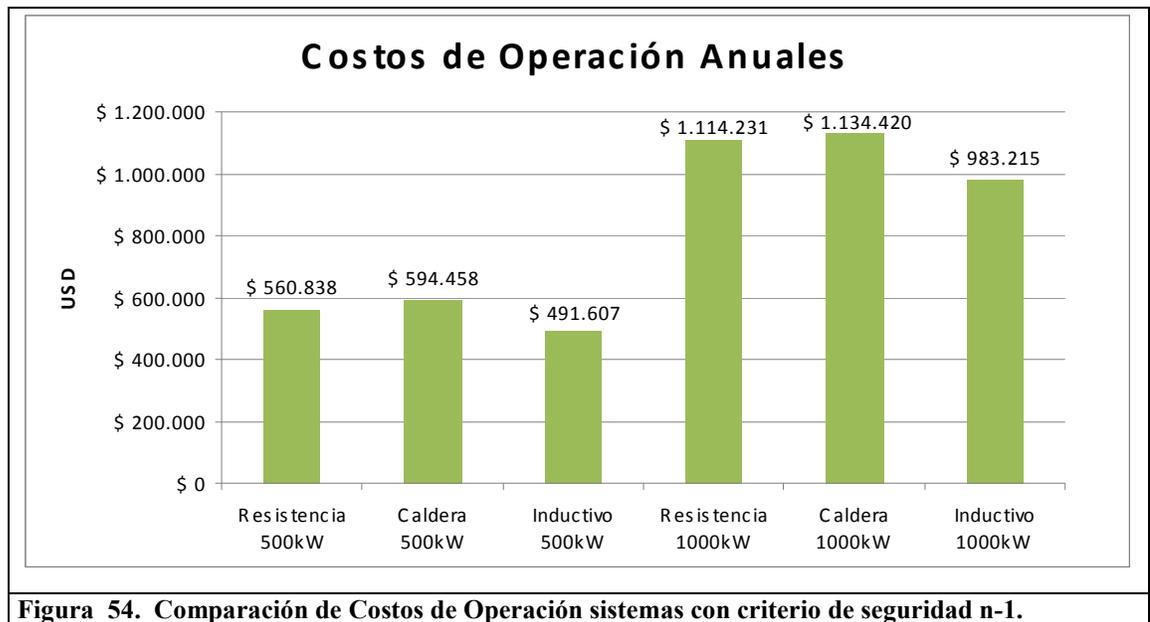
Al tomar en cuenta el criterio de seguridad n-1, los sistemas resistivos y calderas diésel muestran una diferencia importante en comparación a la situación sin el criterio de seguridad, en donde los costos de ambos sistemas son similares (Figura 47 y Figura 48). La diferencia de costos en inversión en sistemas de la misma tecnología entre los casos sin criterio de seguridad y con criterio de seguridad, está entre un 55% y un 65%, siendo el mayor para el caso resistivo debido a la duplicación del calentador eléctrico de resistencias, más costoso que la caldera diésel (Figura 53).

A pesar de esto, los sistemas resistivos y calderas siguen siendo 3-4 veces menores que el costo de inversión de los sistemas inductivos.

### 5.2.3 Costos de operación anual

Para los costos de operación de los sistemas, se siguió la misma metodología usada en el ejercicio sin criterio de seguridad. Los equipos duplicados trabajan a la mitad de su capacidad, aumentando la disponibilidad del proceso, pero disminuyendo la eficiencia global.

Conociendo los valores de la eficiencia de cada sistema, la Figura 54 muestra el costo de operación anual de los sistemas con criterio de seguridad n-1.



**Figura 54. Comparación de Costos de Operación sistemas con criterio de seguridad n-1.**

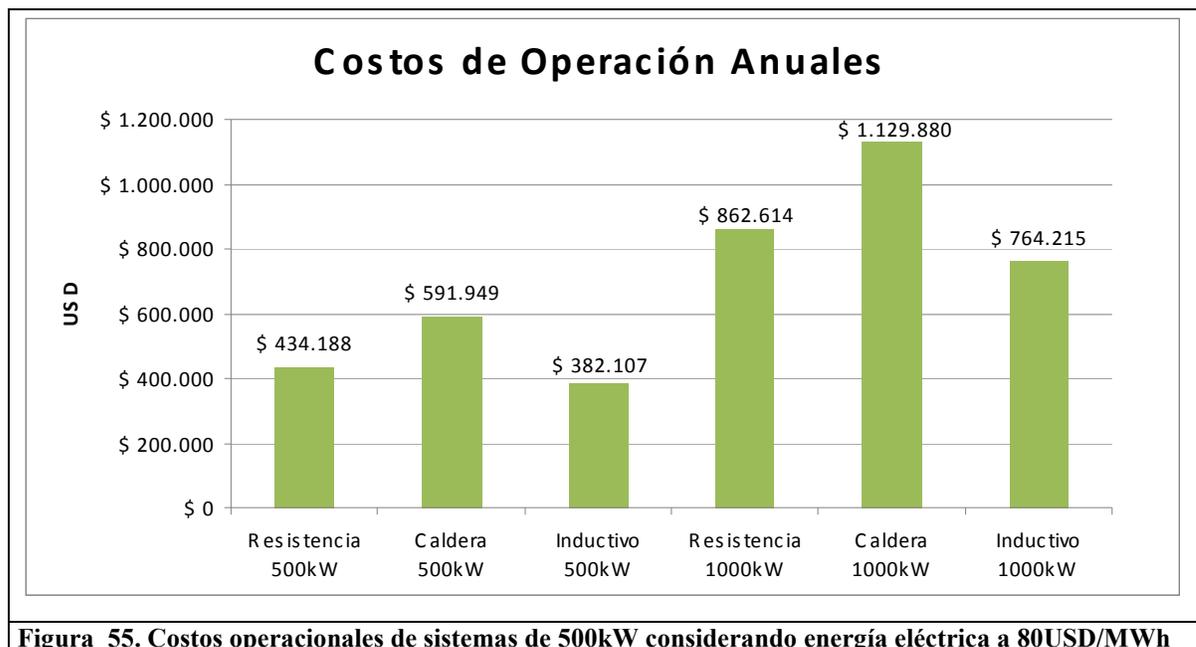
Se observa que al disminuir la eficiencia de los sistemas resistivos y calderas diésel, se aleja el costo de operación anual en comparación con el sistema inductivo, sin embargo las diferencias no son muy grandes con las presentadas en la Figura 49.

Si se analizan ambos sistemas eléctricos, claramente el sistema inductivo muestra una ventaja de ahorros de costos operacionales en procesos críticos. Si se analiza la Figura 50 para procesos no críticos de la sección 5.1.4, los costos operacionales anuales del sistema inductivo de calentamiento son un 3-4% menores en comparación al sistema resistivo para ambos niveles de potencia. En la presente situación, los costos operacionales anuales de la Figura 54 para procesos críticos, muestran que para el sistema inductivo de calentamiento éstos son un 11-12% menores que para los sistemas resistivos.

Los costos no combustibles del sistema de caldera hacen que sea la opción más cara. Hay que recordar que el costo del diésel representa un 85%-90% del total de los costos para ese sistema, y se

puede concluir anticipadamente que debería ser el más económico, pero para procesos críticos los gastos en electricidad en bombas, tableros eléctricos y en operadores explican que el costo aumente por sobre los costos totales de los otros sistemas.

La situación se hace más notable si se considera un costo de energía eléctrica de 80[USD/MWh], como lo muestra la Figura 55.

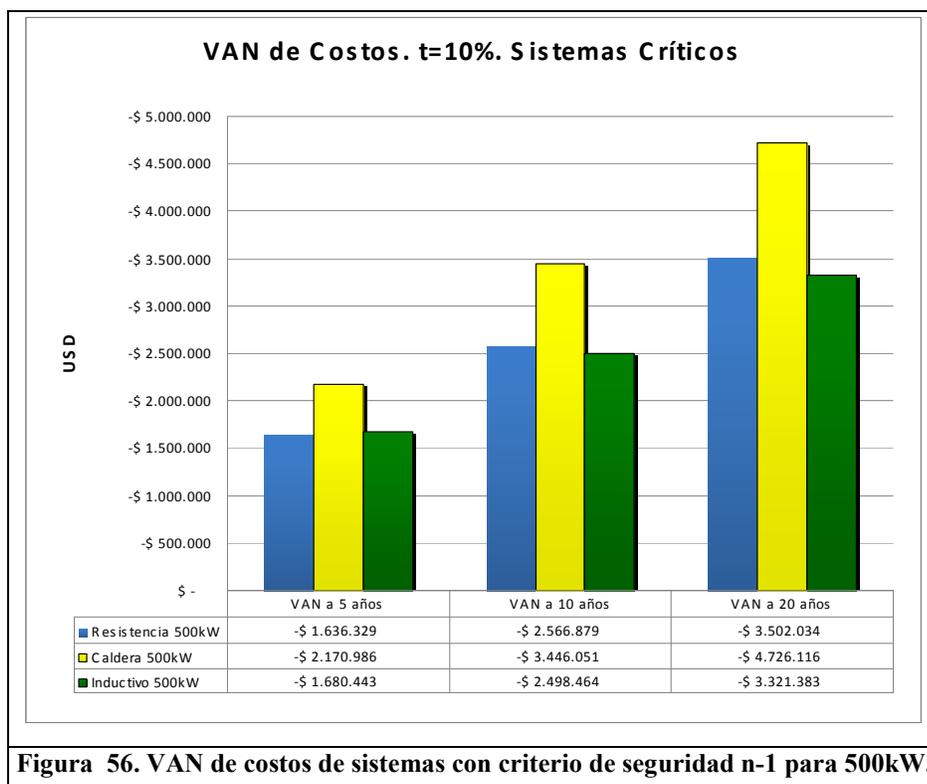


Al ser similares los costos (USD/kWh) de la energía obtenida desde el diésel con la energía obtenida desde la electricidad, los costos del sistema con calderas se alejan mucho más de los sistemas eléctricos. Esto reafirma la importancia que tiene el costo de la energía en los costos totales operacionales de los sistemas de calentamiento, y también de la eficiencia energética de los sistemas.

#### 5.2.4 VAN de Costos

Se realizó una actualización de los costos de inversión y operación a 5, 10 y 20 años de los sistemas configurados para una aplicación crítica en la industria, siguiendo la misma metodología usada en la Sección 5.1.5 empleando los mismos valores para el costo de la energía eléctrica, el precio del diésel, tasa de descuento, depreciación y vida útil de los equipos.

A continuación en la Figura 56 se presentan los resultados para los equipos de 500[kW] actualizados según un horizonte de evaluación de 5, 10 y 20 años, para los sistemas configurados para aplicaciones críticas.

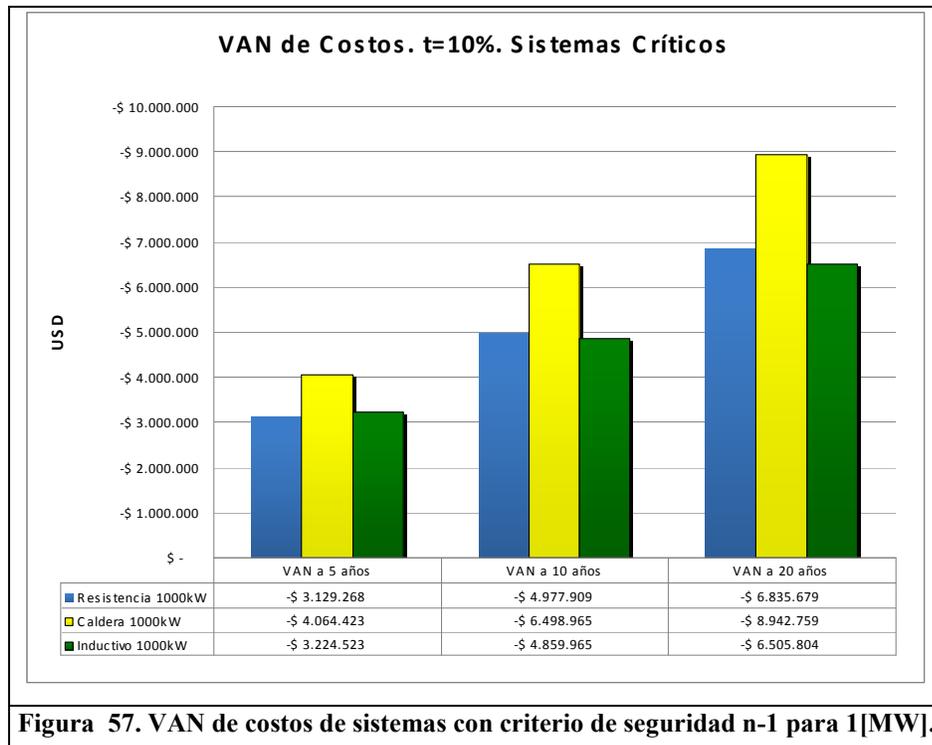


**Figura 56. VAN de costos de sistemas con criterio de seguridad n-1 para 500kW.**

La Figura 56 muestra que el comportamiento de los costos cambia con respecto a la situación sin el criterio de seguridad (ver Figura 51). La duplicación necesaria de varios elementos en los sistemas resistivos y calderas hace que el sistema inductivo sea conveniente para horizontes de evaluación mayores a 5 años. Si bien a 20 años la diferencia del sistema inductivo con el sistema resistivo no es grande, hay que recordar que la inversión inicial en el sistema inductivo es 3 a 4 veces mayor que el sistema resistivo. En este caso, la mayor eficiencia del equipo inductivo permite generar ahorros en costos de energía eléctrica tal que en un horizonte mayor a 5 años permiten recuperar la alta inversión en el equipo, en comparación con el sistema resistivo.

El sistema con calderas diésel sigue siendo más costoso desde cualquier punto de vista, por las razones ya mencionadas en las secciones anteriores.

A continuación en la Figura 57 se muestra el mismo ejercicio para equipos de 1[MW] de potencia.



La Figura 57 muestra que el comportamiento de los costos sigue exactamente el mismo comportamiento que para el caso de los equipos de 500kW analizadas en la Figura 56. Esto ya se observó en el análisis hecho para los sistemas sin el criterio de seguridad.

El sistema resistivo de calentamiento es conveniente sólo para horizontes de evaluación menores a 5 años. Para tiempos de evaluación mayores, el sistema inductivo de calentamiento resulta ser el más económico.

### 5.3 Análisis de Costos de los Sistemas de Calentamiento con Precio de la Energía Variable a Mediano Plazo

Los análisis anteriores muestran el comportamiento de los costos actualizados de cada sistema en diferentes horizontes de evaluación. El análisis suponía un precio constante de los energéticos, que para efectos reales claramente no se cumple. Es por ello que se realizó e investigó proyecciones de los precios de la energía eléctrica y del petróleo diésel a 20 años en Chile. Para ello se tomaron diferentes fuentes de información, tanto nacional como extranjera, para así lograr una estimación que permita realizar análisis posteriores, y que sirva como guía para futuros estudios. Las proyecciones son muy simples y no pretenden ser estimaciones precisas, como las obtenidas de grandes consultoras especialistas en el tema energético.

A continuación se presentan las estimaciones y proyecciones de los niveles de precios de los energéticos, para luego utilizarlos en el análisis de los costos actualizados de los sistemas.

#### 5.3.1 Estimaciones y proyecciones de los energéticos

Se realizó una estimación de los precios de la energía eléctrica y petróleo diésel a 20 años, en base a estimaciones realizadas por consultoras, por la Comisión Nacional de Energía CNE [33] [34] , y datos de los precios históricos.

La estimación del costo de la energía eléctrica para los próximos 20 años, se construyó en base a la indexación de un precio inicial con el valor del Consumer Price Index (CPI) de Estados Unidos y del valor de la tonelada de carbón, en múltiplos iguales con un valor de 0,5, debido a su influencia en los costos de la generación eléctrica.

$$PELP = PELPo \left( \frac{CPI}{CPIo} \cdot 0.5 + \frac{PC}{PCo} \cdot 0.5 \right) \quad (40)$$

donde:

PELP: Precio de la energía eléctrica a largo plazo [USD/MWh].

CPI: Consumer price index en base 1984.

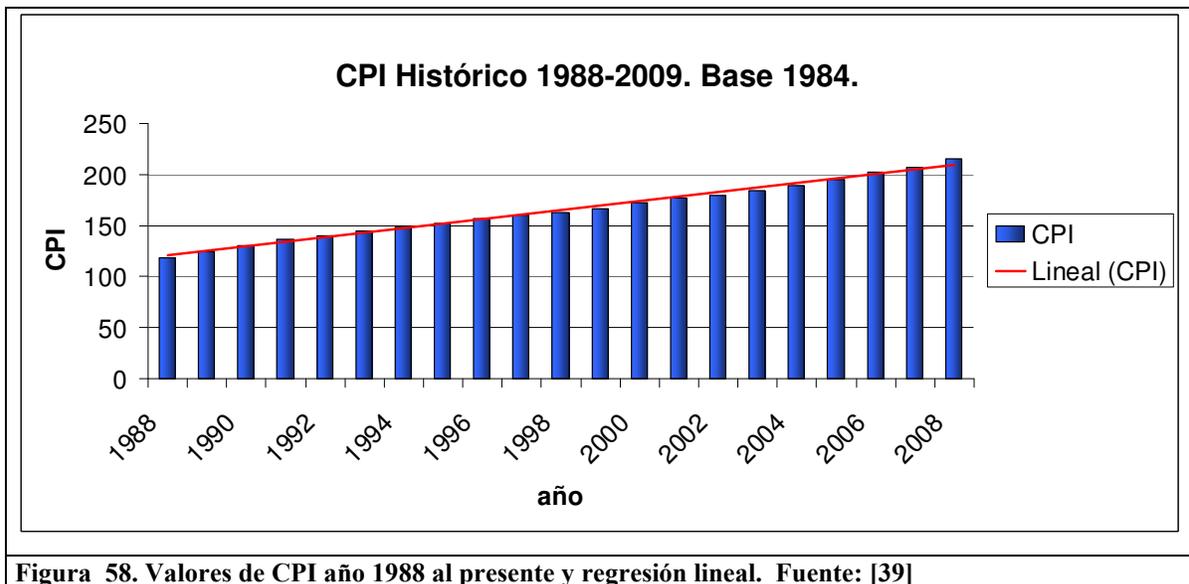
PC: Precio del carbón [US/Ton].

El subíndice cero indica el valor inicial de la serie.

En caso de que el carbón no tenga peso o importancia en el escenario futuro de la generación eléctrica, se realizó la misma estimación del precio de la energía eléctrica sólo considerando el CPI.

$$PELP = PELP_o \left( \frac{CPI}{CPI_o} \right) \quad (41)$$

La serie de valores del CPI desde el año 1988 al presente se muestra en la Figura 58 y se obtuvo de las estadísticas del *Department of Labor* del *U.S Bureau of Labor Statistics*, obteniéndose una regresión lineal con un buen coeficiente de correlación ( $R^2 = 0,9931$ ), el cual se utilizó para estimar el valor del CPI a 20 años.

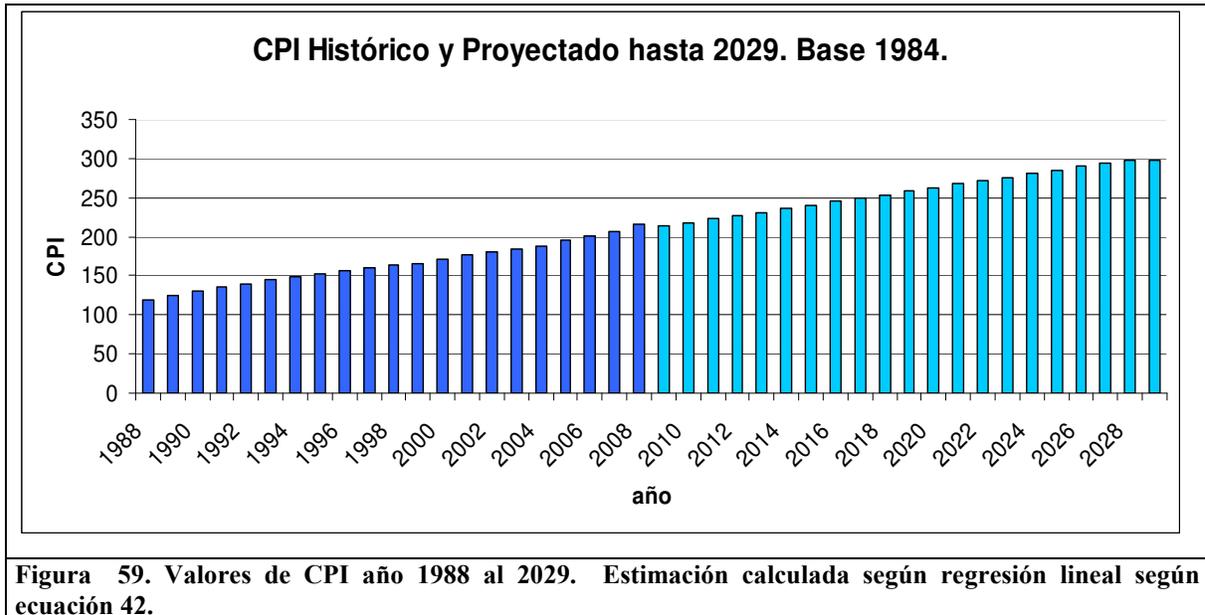


La regresión lineal calculada es

$$CPI(T + 1) = 4,4510 \cdot CPI(T) + 120,4038 \quad (42)$$

Los valores históricos corresponden al promedio anual, y fueron consultados en la referencia [39], sección *Consumer Price Index History Table*.

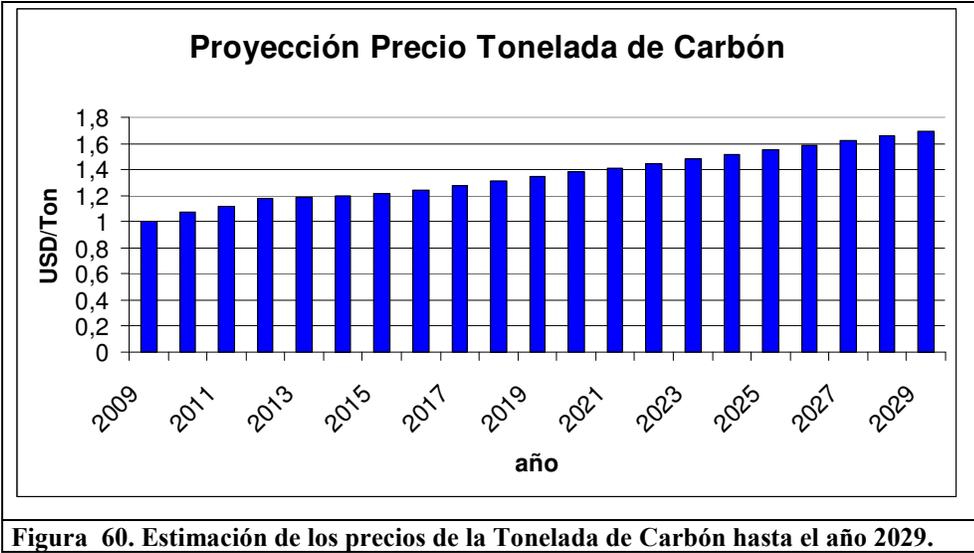
A continuación en la Figura 59 se muestra el gráfico de los valores estimados para el CPI hasta el año 2029.



**Figura 59. Valores de CPI año 1988 al 2029. Estimación calculada según regresión lineal según ecuación 42.**

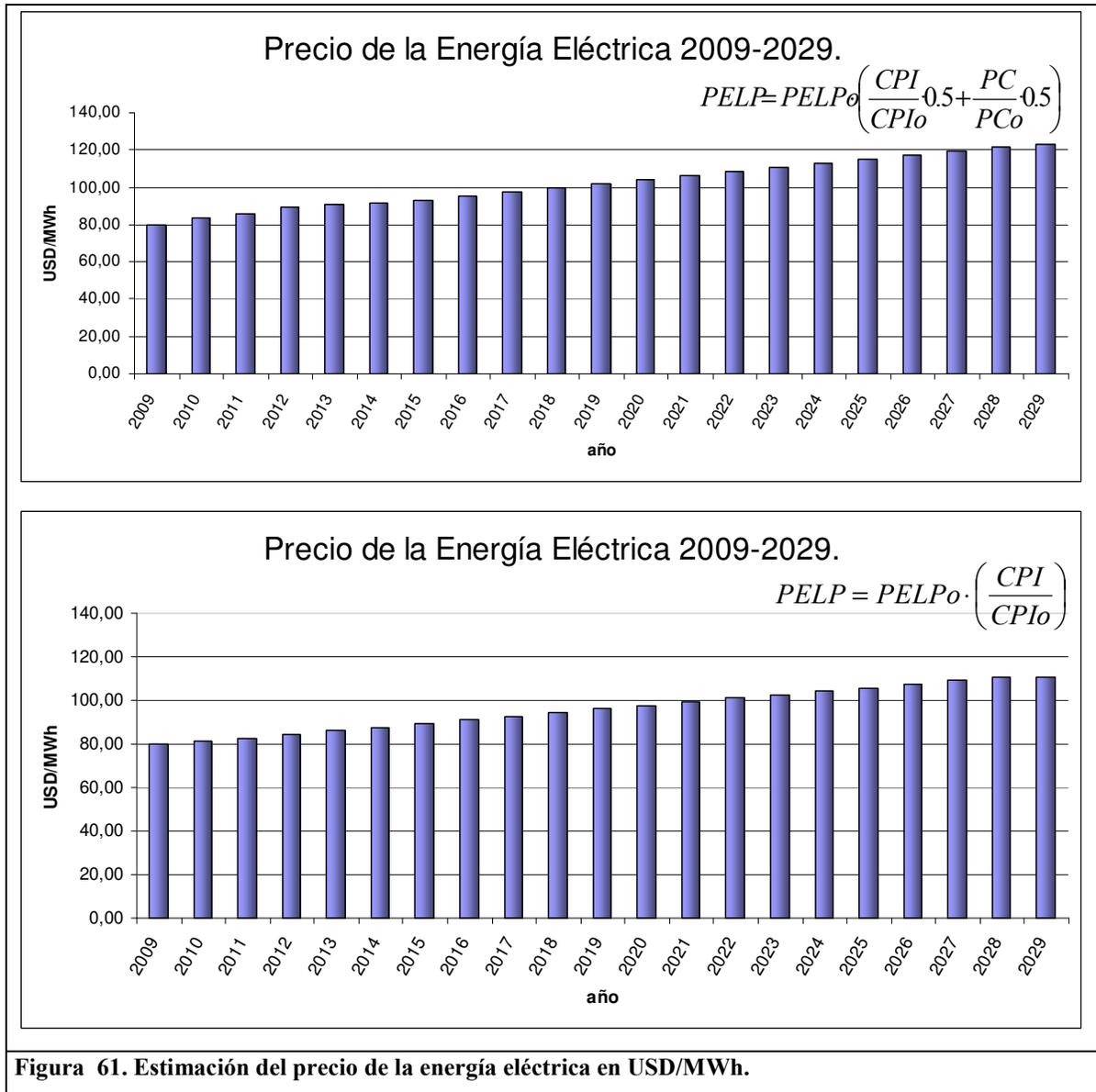
El índice CPI para el año 2029 se estima en un valor de un 39,5% por sobre el valor del año 2009. Este valor es bajo para 20 años, considerando que el índice IPC en Chile ha experimentado un aumento de un 43,5% desde la aplicación de su nueva base en el año 1998, con una inflación controlada [54] .

La estimación del precio de la tonelada de carbón a futuro se basó en la estimación realizada por la CNE en su informe de Precio de Nudo del sistema SIC de Abril 2009 [33] , el cual calcula valores desde el año 2009 al 2019 (en base a precios futuros Nymex y modulación Purvin&Getz). Los valores para los años 2020 a 2029 fueron calculados siguiendo la misma relación lineal de los últimos 5 años (2015-2019) de ésta. A continuación en la Figura 60 se muestra la proyección del precio de la tonelada de carbón 2009-2029.



La estimación calcula que al año 2029, el precio de la tonelada de carbón para generación eléctrica aumentará en un 69,13% con respecto al valor del año 2009.

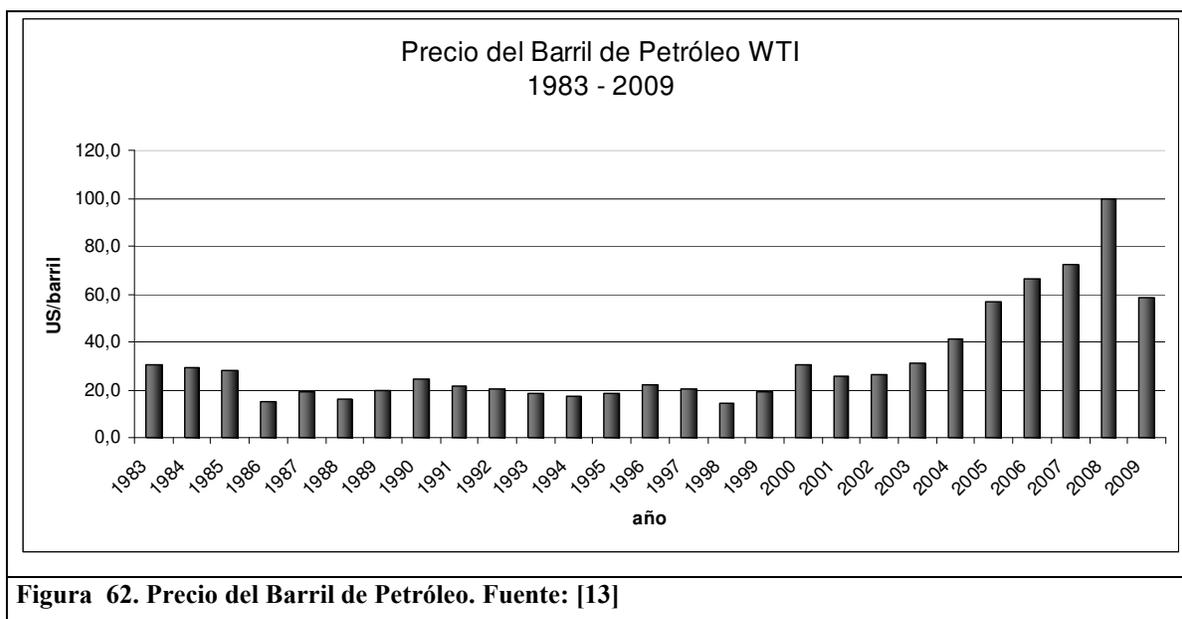
Con las estimaciones presentadas, se procede a calcular los valores del precio de la energía eléctrica hasta el año 2029, según las indexaciones presentadas anteriormente, las cuales se muestran en la Figura 61.



Tomando en cuenta las variaciones del CPI y del precio de la tonelada de carbón, se estima que para el año 2029 el precio de la energía aumentará un 53,87% con respecto al 2009. Si no se toma en cuenta el precio de la tonelada de carbón, el aumento es de 38,62%. Las variaciones año a año para ambos casos mostrados en los gráficos de la Figura 61 varían en el rango entre 1,5% - 4,15%.

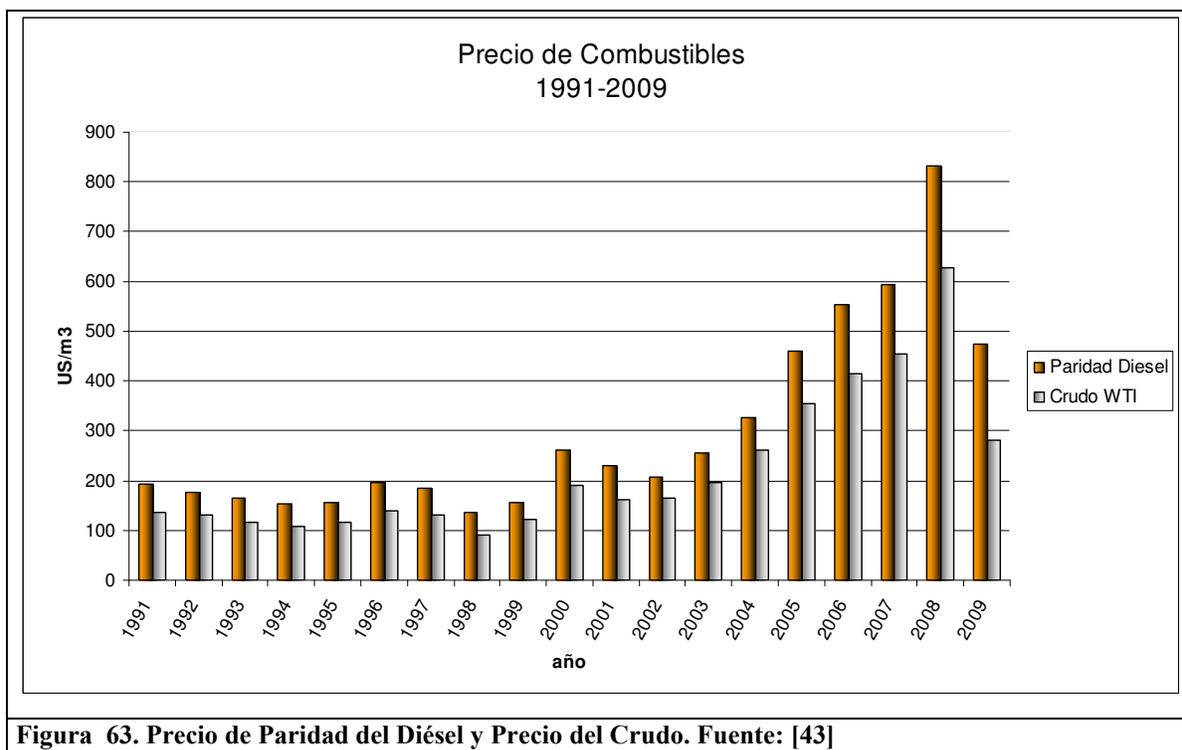
La estimación del precio del diésel es mucho más compleja, ya que depende de múltiples variables y múltiples factores, y la estimación realizada en este trabajo no pretende ser una estimación precisa, sino sólo una herramienta de análisis.

El precio del petróleo presenta una alta variación año a año, tal como se puede observar en el gráfico de la Figura 62.



Se puede observar de la Figura 62 el aumento notable del precio del crudo desde el año 2003 hasta el 2007, donde se vivió una de las crisis económicas del último tiempo.

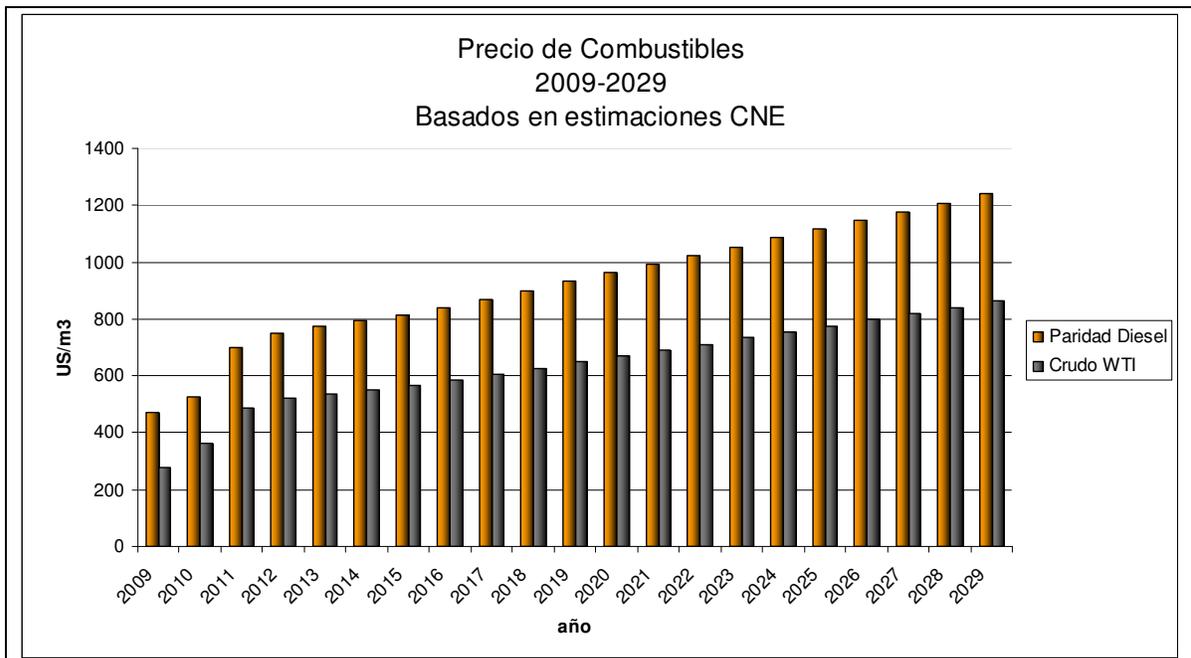
Según los datos de ENAP, el precio de paridad del diésel (precios del diésel puestos en Concón, los cuales incluyen costos de logística de transporte y almacenamiento, pero no se incluyen los impuestos que rigen en Chile, ni los efectos de la aplicación de los fondos de estabilización de precios), sigue un comportamiento similar al petróleo crudo, tal como se puede observar en la Figura 63.



**Figura 63. Precio de Paridad del Diésel y Precio del Crudo. Fuente: [43]**

El precio de paridad del diésel por m<sup>3</sup> históricamente ha sido un 30-45% mayor que precio del m<sup>3</sup> de crudo, según se puede observar de la Figura 63.

Por otra parte, la CNE en su informe de Precio de Nudo de Abril 2009 para el SIC, estima valores anuales promedio del crudo desde el año 2010 al año 2019 [33] . En base a los antecedentes de comportamiento del precio del diésel, se estimaron los valores anuales siguiendo el mismo comportamiento que la estimación hecha por la CNE para el precio del crudo, y se prolongó hasta el año 2029 siguiendo un comportamiento lineal basados en los años 2015-2019. Los resultados de la estimación se muestran en la Figura 64.



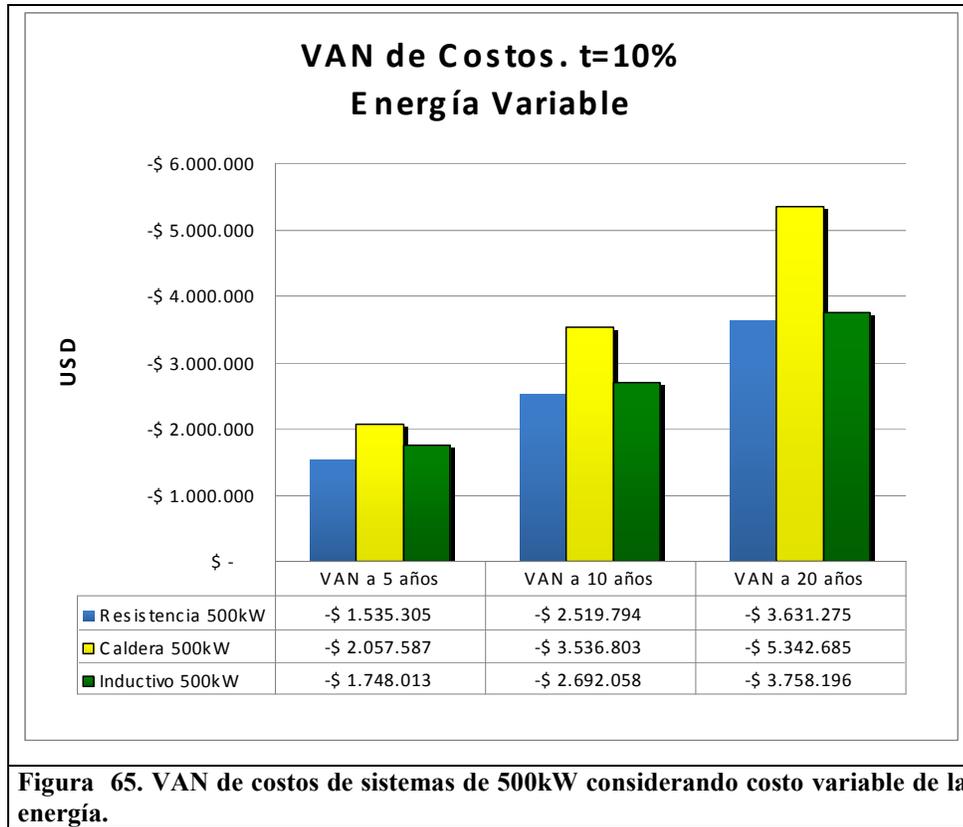
**Figura 64. Precios estimados del diésel (paridad) y petróleo crudo. Fuente: CNE y Elab. Propia**

Las estimaciones de la CNE muestran que el precio del petróleo crudo alcanza su valor histórico más alto en un lapso de 5 años, y luego sigue creciendo de manera sostenida. El valor al año 2029 del precio del crudo y del diésel es un 207,9% mayor al presente.

### 5.3.2 VAN de costos con precio de la energía variable

Se realizó una actualización de los costos de inversión y operación siguiendo la misma metodología utilizada en la Sección 5.1.5 en cuanto a las tasas de descuento, la depreciación y la vida útil de los equipos. El precio de los energéticos varía según las estimaciones mostradas en la Sección 5.3.1. Con ello se pretende establecer el impacto del precio de los energéticos en la evaluación de la nueva tecnología de calentamiento inductivo. El detalle de los cálculos se puede consultar en el Anexo B.

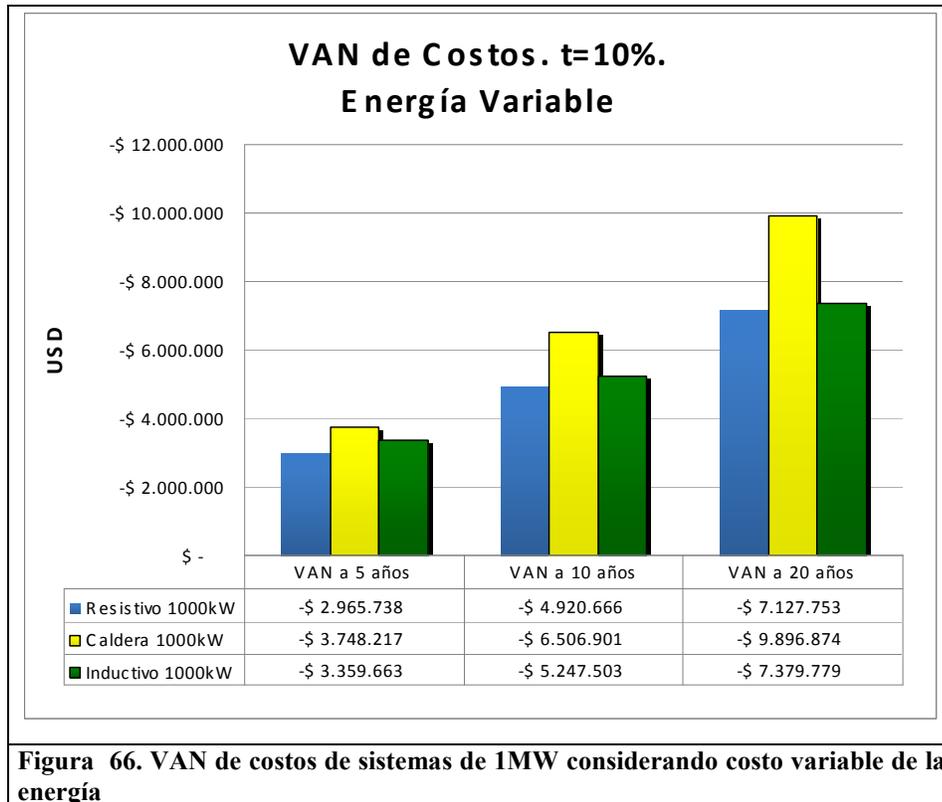
A continuación en la Figura 65 se presentan los resultados para los equipos de 500kW actualizados según un horizonte de evaluación de 5, 10 y 20 años, configurados para un sistema no crítico, es decir que los elementos no se encuentran duplicados para asegurar disponibilidad.



La Figura 65 muestra que los costos actualizados suben con respecto a la situación con los precios de los energéticos fijos, como era de esperarse ya, que los precios de los energéticos suben en todas las estimaciones.

Debido a que el precio del diésel presenta el mayor aumento en las estimaciones utilizadas, la alternativa de la caldera sigue siendo la más costosa de las 3 alternativas. Los costos siguen el mismo comportamiento que en el caso de un costo de energéticos fijos.

La situación para equipos de 1[MW] de capacidad mostrada en la Figura 66 es similar. Los costos siguen la misma tendencia en donde la alternativa de la caldera diésel es la más costosa, luego se encuentra la alternativa inductiva, y la más económica es la alternativa resistiva, tal como se observa en la Figura 66.



En los análisis mostrados, la conveniencia o no depende mucho de la estimación de los precios de los energéticos utilizados. Así por ejemplo, si el costo del diésel tiene una baja considerable o tiene un crecimiento menor al precio de la electricidad, se observa que los costos de las calderas diésel si son competitivas. Todo se produce debido a que en los costos operacionales anuales se explican casi completamente por el costo de los energéticos, como se encontró en la sección 5.1.4 .

#### 5.4 Comparaciones Técnicas de los Sistemas de Calentamiento de Fluido

En cuanto a la naturaleza del fluido, los sistemas resistivos de calentamiento ofrecen soluciones para casi cualquier tipo de fluido, sea este líquido o gas, con diseños especiales de los elementos tubulares para cada caso. En el caso de las calderas de combustibles en general, éstas se dedican a calentar agua y a través de intercambiadores de calor entregan la energía al fluido. Luego se requiere

de diseños especiales de intercambiadores de calor, y las restricciones no recaen sobre la caldera. El sistema de calentamiento inductivo puede ser fácilmente diseñado para adaptarse a cualquier tipo de fluido (gas o líquido) ya que la restricción de diseño recae sólo en el elemento susceptible (materiales, temperaturas máximas y dimensiones). Es así como el sistema inductivo posee versatilidad ante cambios de las características del fluido a calentar, siendo en primera instancia más fácil de adaptar.

El control de la potencia (y/o temperatura) en los sistemas resistivos de calentamiento se realiza a través de contactores o tiristores. En el caso de contactores, éstos tienen una limitada vida útil, y tienden muchas veces a fallar en su operación [70]. Además, con esta alternativa la apertura y cierre de ellos no es tan rápida como en un dispositivo electrónico, causando que el control posea retardos. El control a través de SCR o tiristores es excelente para controlar la potencia, sin embargo tiene la limitante en lo oneroso que resulta en comparación con los contactores, y no hay filtros de armónicas en el caso de contaminación a la red eléctrica causada por la operación de los SCR's. Para el caso de la caldera, el control de potencia se realiza a través del control de la llama (control de combustible y de aire), del control de la temperatura y presión del combustible, del nivel de agua de alimentación y del control de tiro. Esto no permite tener respuestas rápidas ante variaciones bruscas de la potencia demandada y la estrategia de control se hace más compleja que en el caso anterior, ya que se deben considerar también los procesos de circulación de agua en el circuito cerrado y la transferencia de calor por parte de los intercambiadores de calor. En el sistema inductivo de calentamiento las respuestas son rápidas ante variaciones de la potencia. El sistema resistivo posee elementos con una dinámica más lenta que el diseño del susceptible del calentador inductivo. Además, el susceptible parece poseer una mayor robustez ante aumentos importantes de temperatura, ya que los elementos tubulares de calentamiento fallan (su conductor eléctrico interno) de manera común. Gracias al control desarrollado especialmente para este tipo de calentamiento inductivo, se logra un control óptimo ante perturbaciones o variaciones de la potencia demandada. Además, dada la configuración de los equipos de electrónica (filtros), hay una muy baja contaminación de armónicas a la red.

En la misma línea de lo anterior, las respuestas ante variaciones de la potencia demandada en periodos cortos de tiempo también es un tema que diferencia a los tres sistemas. Los sistemas resistivos responden ante variaciones de potencia de manera muy rápida y sin muchos problemas. La mayor dificultad en los sistemas resistivos se encuentra en la disminución de la vida útil de los elementos tubulares de calentamiento. Con los ciclos de trabajo se producen expansiones y contracciones mecánicas de los tubos que provocan fisuras y en el largo plazo fracturas de éstos. En los sistemas con calderas también disminuye la vida útil de los equipos en la combustión

(quemadores, inyectores, válvulas). Además, la operación de las calderas en ciclos de trabajo cortos disminuye la eficiencia de la caldera, aumentando las pérdidas por gases de escape. El sistema inductivo de calentamiento posee una electrónica y control que permite responder ante una demanda variante, pero a la fecha no se han realizado estudios de duración de los materiales en el largo plazo sometidos a este tipo de requerimiento.

En cuanto a los niveles de potencia nominales de los sistemas estudiados, se encuentran grandes diferencias. En los sistemas resistivos de calentamiento, en particular los calentadores con flange, las potencias nominales se encuentran en el rango de 3[kW] a 700[kW] construidos de forma estándar para una unidad. Cada calentador con flange puede agruparse para formar una unidad de gran potencia, típicamente dentro del rango de 2[MW]. Existe la posibilidad por parte de los fabricantes de construcción de equipos de mayor potencia, pero que requieren de un diseño específico para la aplicación. En los sistemas de calentamiento con calderas se pueden encontrar unidades desde 100[kW] hasta 50[MW] de potencia nominal para un sólo equipo (una caldera). En los sistemas inductivos de calentamiento, en primera instancia la unidad más grande será de 500[kW]. Esto importa cuando se requieren de grandes potencias en una determinada aplicación, ya que el sistema inductivo y resistivo requieren de múltiples equipos que pueden resultar más costoso en inversión en comparación a la alternativa de la caldera.

La disponibilidad de espacio es una de las mayores diferencias entre los sistemas estudiados. A continuación en la Tabla 24 se muestra un cuadro comparativo de las dimensiones promedio de cada tecnología.

**Tabla 24. Dimensiones de tecnologías**

Dimensiones	Largo [m]	Alto [m]	Ancho [m]	Superficie [m <sup>2</sup> ]
<b>Resistivo 500kW</b>	2,5	2,0	1,5	3,75
<b>Resistivo 1000kW</b>	3,0	2,5	1,9	5,70
<b>Caldera 500kW</b>	2,5	1,5	1,4	3,50
<b>Caldera 1000kW</b>	2,9	2,0	1,5	4,35
<b>Inductivo 500kW</b>	1,2	0,15	0,15	0,18
<b>Inductivo 1000kW</b>	2,4	0,15	0,15	0,36

Las dimensiones mostradas en la Tabla 24 corresponden a los equipos de calentamiento, sin tomar en cuenta los sistemas anexos como estanques, bombas, intercambiadores de calor y los respectivos tableros eléctricos. Las dimensiones de un intercambiador de calor para 500kW son: 1,5[m] de largo; 0,90[m] de alto; 0,5[m] de ancho, y para 1000kW: 2,0[m] de largo; 1,3 [m] de alto; 0,8[m] de ancho. A ello hay que sumarles las tuberías y bombas de recirculación. Asimismo, en los sistemas resistivos hay que agregar un espacio mínimo de al menos el largo del calentador resistivo

para efectos de mantención y reemplazo al momento de instalarlo, lo que de manera similar ocurre con las calderas. Luego los sistemas con calderas son los que requieren de mayor espacio para su instalación, agregando las distancias requeridas mínimas por normas o para efectos de mantención de los equipos. El sistema inductivo es un sistema más compacto que las alternativas estudiadas.

Con respecto a la eficiencia global de los sistemas, el sistema resistivo es muy eficiente en calentamiento de fluidos, por sobre el 95% de eficiencia. Sin embargo, para aplicaciones generales, es necesaria la configuración de un circuito cerrado de agua con intercambiadores de calor. Esto hace que la eficiencia baje, aumente el espacio ocupado y se consuma más energía eléctrica debido a las bombas de recirculación necesarias. Los intercambiadores de calor son eficientes sólo cuando trabajan en los valores nominales de flujo. Por otro lado, los sistemas con calderas son muy poco eficientes. Si bien las calderas modernas logran tener un 90% de eficiencia, ésta depende de muchas variables, como la temperatura ambiental, la operación (carga), y las necesidades de aire. Además, como ya se comentó, para calentar cualquier tipo de fluido es necesario la configuración de un circuito cerrado de agua, con intercambiadores de calor, estanques de expansión y bombas de recirculación que hacen que la eficiencia pueda bajar mucho si no se opera bajo los niveles de diseño. El calentamiento inductivo posee una alta eficiencia, cercana al 90%, que puede ser elevada hasta el 95% si es aprovechado el calor generado en la bobina inductora. Las pérdidas en la electrónica de potencia son casi independientes del nivel de potencia que se utilice, por lo que a mayor potencia la eficiencia aumenta.

Los sistemas eléctricos (resistivo e inductivo) requieren de la misma fuente de energía, que es el sistema eléctrico. El sistema con caldera requiere de energía tanto del sistema eléctrico (para alimentación de tableros de control, bombas y válvulas) como de estanques de combustibles o gasoductos. En zonas industriales este aspecto parece no tener relevancia, sin embargo si los comparamos en una aplicación minera de alta montaña o en zonas de difícil acceso, este aspecto adquiere importancia. El acceso a combustibles, ya sea diésel, petróleo o gas, es mucho más complejo que el acceso a electricidad. La construcción de gasoductos u oleoductos son proyectos de alta inversión y muy complejos en comparación con una extensión de línea de alta tensión. Si comparamos el abastecimiento periódico de combustible a través de camiones, éstos tienen la incertidumbre de poder llegar a destino, por ejemplo en la época invernal en minería de alta montaña. En este aspecto, los sistemas eléctricos poseen una ventaja en cuanto al acceso a la energía.

Con respecto a la mantención, el sistema inductivo de calentamiento requiere de una mínima mantención a los sistemas electrónicos que posee, la cual se realiza cada 4 meses y que tienen una duración de orden de 1 día. Los sistemas resistivos igualmente poseen una baja mantención, un poco

superior al sistema inductivo. Aparte de la revisión del sistema eléctrico y electrónico, se deben hacer mantenciones a los tubos resistivos, ya que hay depósitos de sarro que disminuye la vida útil. Los sistemas con calderas requieren de una elevada mantención. Se deben hacer mantenciones al sistema eléctrico de la caldera, a las válvulas, quemadores y a las aislaciones que posee. Éstas son costosas, y típicamente se realizan trimestralmente, con una duración de un par de días. La supervisión en los equipos resistivos e inductivos es nula. El sistema es capaz de operar de manera completamente automática, sin la necesidad de un operador. En cambio el sistema con calderas, requiere (por norma de seguridad chilena) de un operador permanente en la caldera, aunque ésta sea completamente automática. Así, el sistema resistivo e inductivo son los que menos atención requieren.

Los sistemas netamente eléctricos no tienen mayores problemas al operar en ambientes de gran altura, como en una faena minera de alta montaña. Al contrario, los sistemas de calentamiento basados en calderas de combustión disminuyen su eficiencia por el hecho de obtener menos oxígeno que el requerido por los diseños..

Si se quiere comparar sistemas de calentamiento de pasada, solamente se puede hablar de los sistemas resistivos y sistema inductivo de calentamiento. En general, las dos alternativas parecen ser similares en sus características, tomando en cuenta que el sistema resistivo hereda muchas de las características de los calentadores con flange (mantenimiento, equipos de control y materiales). Éstos están disponibles para casi cualquier fluido y poseen casi las mismas dimensiones y potencias que el equipo inductivo. Ambas alternativas de calentamiento de pasada poseen la característica de instalación en cascada para obtener niveles de potencia mayores. Sin embargo hay aspectos que los diferencia: el sistema resistivo de pasada aumenta la presión hidráulica del fluido dentro de la tubería debido a que por lo menos una de sus entradas es en  $90^\circ$  con respecto al flujo circulante, lo que provoca un posible reemplazo de las bombas de circulación por otras de mayor capacidad. Esta es una de las restricciones más importantes si se piensa en una aplicación con un gran flujo de fluido, o donde las bombas de circulación tengan una importancia notable. El sistema inductivo de calentamiento no requiere de cambio de bombas ya que no altera la presión interna del fluido (las pérdidas hidráulicas son mínimas). Tomando en cuenta estos aspectos técnicos, el sistema inductivo de calentamiento de pasada presenta ventajas en comparación a su homólogo resistivo. Con respecto a la homogeneidad de la temperatura los sistemas inductivos de calentamiento presentan una ventaja al lograr una mejor distribución en el fluido. Como se aprecia en el Anexo A, las resistencias eléctricas no logran esta homogeneidad, recurriendo a las turbulencias naturales que se forman con los cambios de dirección de la tubería para lograr esta homogeneidad. Sin embargo, esto sólo es posible para fluidos poco viscosos, ya que en caso contrario la distribución no uniforme de

temperatura se mantendrá y se requerirán de otras técnicas para lograr una distribución de temperatura mejor.

## **5.5 Comparaciones Económicas de los Sistemas de Calentamiento de Fluido**

Considerando los costos de inversión, resalta la importancia de considerar tanto el equipo mismo de calentamiento como también los equipos auxiliares en cada sistema estudiado. Las calderas son las más económicas para un mismo nivel de potencia si se considera solamente la tecnología, sin embargo, la necesidad de equipos auxiliares para su operación hace que sea comparable en costos con el sistema resistivo de calentamiento. Incluso si se toman en cuenta duplicaciones de la tecnología por temas de seguridad, los costos de inversión son comparables entre ambos. Además, los sistemas con calderas presentan la desventaja de la instalación en un espacio especial que se rige por normas nacionales de seguridad. Los sistemas resistivos e inductivos no presentan esta restricción. Considerando todo lo anterior, el sistema inductivo de calentamiento es el más costoso en inversión, debido a los costos de la electrónica de potencia asociado a la fuente de alimentación y control del equipo.

En el estudio se demostró que los costos de los energéticos son los que determinan en gran medida que un sistema sea más económico en costos de operación que otro (Anexo B, Figura B.1 y B.2). Actualmente (Septiembre 2009) el costo del kWh térmico generado por diésel es más económico que el kWh térmico generado en el sistema interconectado central y del norte grande.

En el escenario futuro proyectado por la CNE y ENAP para los precios de los energéticos, la alternativa resistiva es la más económica en cualquier horizonte de evaluación (debido al aumento del precio del petróleo y disminución de la energía eléctrica). Si en este mismo escenario futuro, se consideran los sistemas configurados con un criterio de seguridad n-1, los sistemas inductivos de calentamiento son los más económicos para horizontes de evaluación mayores a 5 años.

Se observó que si se toman valores fijos de los energéticos para todo el horizonte de evaluación (y comparables entre diésel y electricidad), el sistema inductivo posee los menores costos de operación anuales debido a su alta eficiencia, para cualquier nivel de potencia y tomando en consideración o no la duplicidad de los elementos por seguridad.

Tomando en cuenta tanto los costos de inversión como los costos de operación dentro de una evaluación de proyecto, los menores costos de operación anuales del sistema inductivo hacen que el proyecto sea el más conveniente para horizontes de evaluación superiores a 5 años, sólo si se

considera la duplicidad de los elementos por criterios de seguridad. Si no se toma en cuenta este criterio de seguridad, los sistemas resistivos muestran ser los más convenientes para cualquier horizonte de evaluación.

# Capítulo 6

## Conclusiones y Trabajo Futuro

En el este capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas de este estudio y de las comparaciones técnicas-económicas efectuadas. También se esbozan algunas sugerencias de trabajo futuro a desarrollar posterior a este estudio.

### 6.1 Conclusiones Generales

Considerando todos los aspectos estudiados en el presente trabajo de tesis, se puede concluir que los objetivos planteados inicialmente para esta investigación fueron plenamente alcanzados.

Se lograron establecer y comparar las principales características técnicas de los sistemas considerados en el presente estudio, y que permiten establecer las ventajas comparativas en situaciones generales de calentamiento de fluidos. Estas características son: la precisión del control, la eficiencia global del sistema, la necesidad de equipos auxiliares (tanto en costos como en espacio), el mantenimiento, la vida útil, la capacidad de resistencia a la corrosión para distintos fluidos, los puntos calientes generados, la homogeneidad del calentamiento, la rapidez de la respuesta y el espacio físico requerido por la tecnología.

Los sistemas resistivos de calentamiento de fluidos que actualmente existen en el mercado logran satisfacer la mayoría de los requerimientos para diferentes tipos de fluidos y para la mayoría de las aplicaciones industriales y semi-industriales. Poseen diseños estándar con potencias nominales entre los 3 y 700[kW] de potencia nominal, con equipos de control electrónicos y mecánicos. Son comparables en tamaño con las calderas de combustibles (para la misma potencia) y requieren de bajo mantenimiento. Su instalación dentro de una línea de proceso existente obliga a modificar las presiones de trabajo del fluido, o establecer sistemas utilizando intercambiadores de calor. La vida

útil es de por lo menos 10 años, y su disponibilidad es alta si se opera bajo valores de diseño y de forma continua. No existen soluciones estándar para grandes potencias (sobre los 10[MW]) lo que aumenta el costo de inversión de ellas, por lo que no son una solución para un gran nivel de potencia requerida.

Los sistemas de calentamiento en base a calderas diésel ofrecen soluciones para casi todos los niveles de potencia, desde unos cientos de kilo watts hasta decenas de mega watts. Su utilización obliga a la instalación de un circuito cerrado de agua e intercambiadores de calor para calentar cualquier tipo de fluido. El control de la temperatura (potencia de la caldera) es más complejo y requiere de manipular válvulas, equipos electrónicos y considerar las dinámicas de cada elemento del sistema. La vida útil es menor que los equipos eléctricos, así como también su disponibilidad. Su eficiencia depende de las condiciones ambientales de donde se instale (temperatura ambiental, presión atmosférica, densidad del aire) y de la operación de la misma (ciclos de trabajo, porcentaje de carga), pero siempre menor a los sistemas eléctricos de calentamiento. Aunque sea totalmente automática, por norma chilena de seguridad requiere de supervisores a toda hora, y salas especiales para su instalación. El requerimiento de combustible puede ser un problema si la accesibilidad para el abastecimiento es compleja, necesitando de estanque de acumulación de reserva para posibles contingencias. Requiere de mantenciones periódicas para evitar fallas en sus elementos internos.

El sistema de calentamiento inductivo pretende ser la solución para ciertos tipos de aplicaciones. Los niveles de potencia van desde unos pocos kilo watts hasta 500[kW]. Su diseño permite el calentamiento de casi cualquier fluido, siendo una solución muy compacta en comparación a los otros sistemas alternativos. Posee una precisión mayor en el control de la temperatura, y no obliga a la modificación de ningún elemento cuando se instala dentro de una línea de proceso existente, así como tampoco requiere de grandes mantenciones ni de sistemas auxiliares.

Los costos de inversión del sistema inductivo son elevados en comparación a las alternativas, y los costos de operación son básicamente el costo de los energéticos para los 3 sistemas estudiados. Así, la conveniencia en este aspecto depende de los precios de la electricidad y de los combustibles. Sin embargo, las estimaciones realizadas por consultoras y organismos especializados predicen una disminución del precio de la energía eléctrica y un aumento del precio de los combustibles en el mediano plazo, por lo que se estima que los sistemas eléctricos tendrán una ventaja en relación a los costos de operación en el mediano plazo.

El sistema inductivo de calentamiento se presenta como ventajoso para situaciones en donde exista una tubería en funcionamiento con un flujo determinado, con restricciones de espacio o donde no sea posible modificar los elementos existentes instalados y se requiera de un control preciso con

respuestas comparativamente rápidas ante perturbaciones. Además, es mucho más fácil adaptarlo a diferentes tipos de fluidos, con variaciones solamente del diseño del susceptor.

El sistema resistivo de calentamiento es ventajoso cuando no se requiere de un control muy fino de calentamiento y donde esté disponible el espacio suficiente para su instalación. Además presenta ventajas en procesos no críticos, es decir, donde no se requiere de elementos duplicados de seguridad para mantener el proceso de calentamiento en todo momento. Esto condicionado a la potencia requerida, ya que para grandes potencias los costos de la energía eléctrica que consume el sistema resistivo es mayor a los costos que produce un sistema con calderas de la misma potencia y comportamiento.

El sistema con calderas presenta ventajas ante situaciones donde se requiera de un elevado nivel de potencia (sobre los 10 [MW]), ya que son más económicas tanto en inversión como en operación, en aplicaciones donde no se requiera de un preciso control de temperatura y exista el espacio disponible para la instalación del sistema completo de bombas, intercambiadores de calor, estanques y válvulas.

Para una aplicación minera, en procesos tales como biolixiviación y electro-obtención, el calentamiento inductivo se presenta como un método eficaz y ventajoso económicamente, con un control preciso de la temperatura que responde rápidamente ante cambios del flujo de solución o cambios en la temperatura del fluido. En biolixiviación, sus dimensiones compactas permiten ser instalada en la sección final de las tuberías de riego, eliminando las pérdidas de calor por las tuberías (como no ocurre en el caso de la instalación de una caldera diésel o eléctrica) aumentando la eficiencia del proceso. La instalación de una caldera diésel para este tipo de aplicaciones no es eficiente, lo que genera costos mayores en consumo de energía, se requieren de operadores de calderas para un proceso que no lo justifica, y además es una solución contaminante. La instalación de una caldera eléctrica requiere de la configuración de un sistema de circuito cerrado de agua, con pérdidas en los distintos elementos que la componen, un mantenimiento mayor de los equipos y su instalación óptima es en la sección inicial de la tubería de riego, lo que provoca ineficiencias y un peor control de la temperatura de la solución.

## 6.2 Trabajo Futuro

A partir de los estudios realizados en esta investigación y como una manera de complementar la información expuesta en este trabajo de tesis, se considera conveniente realizar los estudios adicionales en las siguientes direcciones.

- Estudio de comportamiento a largo plazo del susceptor y del sistema de calentamiento por inducción magnética. Se requiere analizar los posibles efectos de los depósitos minerales sobre la superficie del susceptor en el largo plazo, ya que éstas provocan un aumento de la temperatura en el material del susceptor, disminuyendo su vida útil. El material se puede volver quebradizo y romper debido a las fuerzas generadas por el fluido (de corte, de empuje y de arrastre). Además, los posibles depósitos en el largo plazo podrían provocar una obstrucción al paso del fluido (en el caso de líquidos), aumentando la presión.
- Factibilidad de aplicación en calentamiento de combustibles. Si bien el diseño del susceptor no requiere de grandes cambios para aplicar el calentamiento sobre diferentes fluidos, se debe estudiar la factibilidad de aplicación de calentamiento de petróleo, gas y combustibles líquidos y gaseosos en general. Se vislumbra que en estas aplicaciones el calentamiento inductivo podría ser ventajoso, sobretudo en ciudades con temperaturas muy bajas y en donde estos combustibles deben ser calentados para poder ser consumidos o trasladados. En Europa y Norte América existen grandes oleoductos que calientan el combustible con vapor de agua o resistencias eléctricas, y el calentamiento inductivo puede tener mayores eficiencias y una mayor precisión del control de la temperatura.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Aplicaciones Petroquímicas. La lista de empresas es larga, y como ejemplo puede citar a la empresa EXHEAT internacional. <http://www.exheat.com/product-applications.html>  
Página consultada el 12 de diciembre 2009.

## Referencias

- [1] Agudelo, J.R.; Armas, O.; Lapuerta, M.; Sánchez, C.A.; “Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Parte 1: Funcionamiento”. Información Tecnológica. Volumen 17, N° 5, 2006, pp. 21-30. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642006000500005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642006000500005&script=sci_arttext)  
Página consultada el 11 de Agosto 2009.
- [2] American society of mechanical engineers (ASME). “Fired steam generators” ASME Std. PTC-4 2008, 2008, pp. 67-109.
- [3] Angulo, A.; Carvajal, F.; Simulaciones magnetohidrodinámicas para proyecto Fondef D05I10098 Hito I. Informe Técnico. Informe de proyecto Fondef D05I10098, Julio 2007. pp.17-18.
- [4] Arancibia, A. Informe de avance científico – tecnológico N°2. Anexo C.2.19.- Análisis situación actual Los Bronces. Informe de proyecto Fondef D05I10098, 16 de Agosto 2009. pp 17-19.
- [5] Arguimbau, F. Combustibles y combustión. Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Barcelona: Editorial José Montesó, 1950.
- [6] Astigarraga, J. Hornos industriales de inducción: teoría, cálculo y aplicaciones. Madrid: Editorial McGraw-Hill, 1995, pp. 1-3.
- [7] Astigarraga, J. “Hornos industriales de resistencia: teoría, cálculo y aplicaciones”. Madrid: Editorial McGraw-Hill. 1994., pp. 3-6.
- [8] Astigarraga, J. Ibid, pp. 15-18.
- [9] Astigarraga, J. Ibid, pp. 214-219.
- [10] Baber, H. Electroheat. Londres: Editorial Granada, 1983, pp. 1-5.
- [11] Baber, H. Ibid, pp. 67, Tabla 3.3.
- [12] Baber, H. Ibid, pp. 50-71.
- [13] Banco Central de Chile. Base de datos estadísticos, precios de productos básicos. Petróleo WTI. Dolores/barril. Disponible on line: [http://si2.bcentral.cl/Basededatoseconomicos/951\\_455.asp?f=M&s=Precio-petroWTI](http://si2.bcentral.cl/Basededatoseconomicos/951_455.asp?f=M&s=Precio-petroWTI)  
Pagina consultada el 15 de Octubre 2009.
- [14] Borghi, R.; Destriau, M.; De Soete, G. Combustion and flames: chemical and physical principles. Paris: Editorial Technip, 1998, pp. 48-51.

- [15] Canales, J. E. Análisis y evaluación técnico-económica de alternativas de suministro de calor para procesos de baja temperatura en una planta manufacturera de cobre. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Departamento de Ingeniería Civil Industrial, Universidad de Chile, 1985.
- [16] Castells, X. Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid: Editorial Fundación Universitaria Iberoamericana, 2005, pp. 84-86.
- [17] Casas, J. Modelación de procesos de biolixiviación de minerales de cobre en pilas y botaderos. Tesis Doctoral de Ciencias de la Ingeniería mención Química. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Chile, 1996.
- [18] Catálogo Caloritech. Section A. Elements, specialty and transit heaters. Disponible on line: [http://www.ccithermal.com/Product\\_Doc/Caloritech/Catalog/Caloritech\\_SectionA.pdf](http://www.ccithermal.com/Product_Doc/Caloritech/Catalog/Caloritech_SectionA.pdf)  
Página consultada el 20 Abril 2009.
- [19] Catálogo Caloritech. Section B. Immersion heaters. Disponible on line: [http://www.ccithermal.com/Product\\_Doc/Caloritech/Catalog/Caloritech\\_SectionB.pdf](http://www.ccithermal.com/Product_Doc/Caloritech/Catalog/Caloritech_SectionB.pdf)  
Página consultada el 21 de Abril 2009.
- [20] Catálogo Caloritech. Section F. Control. Disponible on line: [http://www.ccithermal.com/Product\\_Doc/Caloritech/Catalog/Caloritech\\_SectionF.pdf](http://www.ccithermal.com/Product_Doc/Caloritech/Catalog/Caloritech_SectionF.pdf)  
Página consultada el 21 de Abril 2009.
- [21] Catálogo de Productos Chromalox. <http://www.mychromalox.com>  
Página consultada el 1 Junio 2009.
- [22] Catálogo Goodfellow Company. Sección R&D products. Disponible on line: <https://www.goodfellow.com/>  
Página consultada el 4 Junio 2009.
- [23] Catálogo Indeco. Tubular and finned tubular elements C50-4. Disponible on line: [http://www.indeco.com/images/C50\\_CatalogComplete.pdf](http://www.indeco.com/images/C50_CatalogComplete.pdf)  
Página consultada el 6 de Abril 2009.
- [24] Catálogo Johnstone Boiler. Calderas de 3 y 4 pasos. Disponible on line: [http://www.johnstonboiler.com/Products/brochure\\_espanol.pdf](http://www.johnstonboiler.com/Products/brochure_espanol.pdf)  
Consultado en agosto 2009.
- [25] Catálogo KSB. Bombas de alta presión con ejecución en línea Movitec. Instrucciones de operación e instalación. Disponible on line: [http://www.ksb.com/ksb/web/CL/es/CL\\_es\\_root.html](http://www.ksb.com/ksb/web/CL/es/CL_es_root.html)

- Página consultada el 30 de Septiembre 2009.
- [26] Catálogo Morgan Advanced Ceramics Co. Luminex™- Magnesium oxide for high temperature electrical insulation. Disponible on line:  
<http://www.morganadvancedceramics.com/markets/luminex.pdf>  
Página consultada el 7 de Mayo 2009.
- [27] Catálogo Omegalux. Tubular heaters. Application guidelines. Disponible on line:  
[http://www.omega.com/Heaters/pdf/HEATER\\_APP\\_NOTE\\_REF.pdf](http://www.omega.com/Heaters/pdf/HEATER_APP_NOTE_REF.pdf)  
Página consultada 6 de Abril 2009.
- [28] Catálogo Special Metals. Incoloy alloy 800. Disponible on line:  
<http://www.specialmetals.com/documents/Incoloy alloy 800.pdf>  
Página consultada 1 de Junio 2009.
- [29] Catálogo Tuerk-Hillinger. Inmersion Heaters. Disponible on line:  
<http://www.tuerk-hillinger.de/index.php?lang=en&cont=produkte/katalog>  
Página consultada 6 de Abril 2009.
- [30] Catálogo Watlow. Control systems. Disponible on line:  
<http://www.watlow.com/literature/catalogs/files/controller.exe>  
Página consultada el 21 de Abril 2009.
- [31] Chañique, G. Costos y presupuestos de edificación: cálculos prácticos, análisis de precios y datos para la confección de presupuestos de edificios. Cuarta Edición. Santiago: Colegio Constructores Civiles, 1990.
- [32] Comisión Nacional de Energía CNE, Balance nacional de energía 2008. Santiago, Chile.  
Disponible on line:  
[http://www.cne.cl/cnewww/export/sites/default/06\\_Estadisticas/Documentos/BNE2008.xls](http://www.cne.cl/cnewww/export/sites/default/06_Estadisticas/Documentos/BNE2008.xls)  
Página consultada el 14 de Diciembre 2009.
- [33] Comisión Nacional de Energía CNE, Fijación de precios de nudo abril de 2009 sistema interconectado central (SIC). Informe técnico definitivo. Santiago, Chile, 2009, pp. 40.
- [34] Comisión Nacional de Energía CNE, Fijación de precios de nudo abril de 2009 sistema interconectado del norte grande (SING). Informe técnico definitivo. Santiago, Chile, 2009. pp. 22-24.
- [35] Curran, J.S.; Featherstone, A.M.; “Electric-induction fluid heaters”, Power engineering journal. Volumen 2, N° 3, Mayo 1988, pp. 157 – 160.
- [36] Davis, J.R. Heat-resistant materials. Materials Park, Ohio: Editorial ASM International, 1997. pp. 73-77.

- [37] Dehmlaei, R.; Shamanian, M.; Kermanpur, A. "Microstructural changes and mechanical properties of incoloy 800 after 15 years service". Materials characterization. Volumen 60, N° 3, Marzo 2009, pp. 246-250.
- [38] De La Sen-Sanz, A.; Galvan-Marcos, S.; Bielza-Lino, J.; Curso sobre control de calderas. International Society of Automation (ISA) Sección Española, Noviembre 2000, pp. 3-1 – 3-73.
- [39] Department of Labor, U.S. Bureau of Labor Statistics. Consumer Price Index, all urban consumers – (CPI-U), all items. 1982-84=100. Disponible on line: <http://www.bls.gov/CPI/#tables>  
Página consultada el 13 de Octubre 2009.
- [40] Dugan, R.E.; Jones, J.B.; Ingeniería termodinámica. México, D.F.: Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997, pp. 510-511.
- [41] Dutari, J. Proyecto de plantas de vapor. Disponible on line: <http://www.juandutari.htmlplanet.com/index.html>
- [42] ENAMI. Licitación O.C.A N° F.P 197 Petróleos diésel y fuel oil 6 para: Fundación Hernán Videla Lira y plantas mineras. Anexo A. Especificaciones técnicas del petróleo diésel, 2008.
- [43] ENAP. Precio de paridad del diésel y precio del crudo. Disponible on line: [http://www.enap.cl/comercial\\_relations/tabla\\_precios\\_paridad.php](http://www.enap.cl/comercial_relations/tabla_precios_paridad.php)  
Pagina consultada el 16 de Octubre 2009.
- [44] Entrevista telefónica con Ing. Sergio Cornejo, ingeniero planificador, coordinador asset management, mining división Los Bronces. Santiago, 4 de Noviembre de 2009.
- [45] Entrevista personal con Ing. Ricardo Fuentes, gerente de investigación y desarrollo IDT S.A. Santiago, 27 de Noviembre 2009.
- [46] Errázuriz, M. Variación de costos de construcción de edificios habitacionales en función del número de pisos. Tesis para optar a Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2004.
- [47] Fuentes, R. Informe para Fondef de avance de ensayos en el prototipo de laboratorio. Informe de proyecto Fondef D051I10098, Enero-Junio 2008, pp 19-29.
- [48] Fuentes, R.; Campaña, F.; Informe estudio de caída de presión en la tubería en función de los parámetros constructivos del susceptor para el prototipo industrial de 500 [kW]. Departamento de Electricidad, Universidad Técnica Federico Santa María. Informe de proyecto Fondef D051I10098, 17 de Agosto 2009, pp 2-5.

- [49] Fuentes, R.; Juliet, J.; Angulo, A.; Campaña, F.; Informe de resultados de simulaciones para el prototipo industrial de 500[kW]. Departamento de Electricidad, Universidad Técnica Federico Santa María. Informe de proyecto Fondef D051I10098, 1 de Julio 2009, pp 17-20.
- [50] Fundación Chile: Dirección ChileCompra, Guía práctica de eficiencia energética, Ministerio de Hacienda, Santiago, Chile. Disponible on line: [http://www.ppee.cl/576/articles-58693\\_doc\\_pdf.pdf](http://www.ppee.cl/576/articles-58693_doc_pdf.pdf)  
Página consultada el 14 de Diciembre 2009.
- [51] Garreaud, R. Apuntes de curso GF45A Introducción a la meteorología. Clase 2: Estructura y composición de la atmósfera y el océano. Universidad de Chile, FCFM. Semestre otoño 2009.
- [52] Guibet, J.C.; Faure, E. Carburants et moteurs: technologies, énergie, environnement, Volume 1. Paris: Editorial Technip, 1997, pp. 68.
- [53] Guo, B.; Lin, D.C.; Feng, Y.L.; Laknath, K.G.D.; Syedulhaq, M.; Nakaoka, M.; “New conceptual electromagnetic induction fluid heating system using resonant PWM inverter with auto-tuning PID controller”, Proceedings of the IEEE international conference on technology ICIT, 2-6 Diciembre de 1996. pp. 390 – 394.
- [54] Instituto nacional de estadísticas (INE) Chile. Índice IPC base 1998. Disponible on line: [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/estadisticas\\_precios/ipc/series\\_estadisticas/series\\_estadisticas.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_precios/ipc/series_estadisticas/series_estadisticas.php)  
Página consultada el 15 de Octubre 2009.
- [55] Kajiyama, A.; Guo, B.; Nakaoka, M.; Uchihori, Y.; “Innovative development of electromagnetic induction-based fluid-heating system using resonant PWM inverter”, Proceedings of the power conversion conference. Volumen 2, Agosto 1997, pp. 977 – 982.
- [56] Kakaç, S. Boilers, evaporators and condensers. New York: Editorial John Wiley & Sons, 1991, pp. 187-191.
- [57] Kakaç, S. Ibid, pp. 398-401.
- [58] Kessinger Publishing Co. Steam its generation and use. Editorial Kessinger Publihing, trigésima sexta edición, 1992, pp. 165-166.
- [59] Lindsley, D. “Power-plant control and instrumentation: the control of boilers and HRSG systems”. Volume 58 of IEE control engineering series. Editorial IET, 2000, pp. 65.
- [60] Mataix, C. Turbomáquinas térmicas. Madrid: Editorial Dossat, 1973, pp. 731-734.
- [61] Matweb.com. Base de datos con propiedades del Cobre (Annealed Copper). <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9aebc83845c04c1db5126fada6f76f7e&ckck=1>

Página consultada el 7 de Mayo 2009.

- [62] Mercado, R. Factibilidad técnica y económica del reemplazo de una caldera a petróleo por una caldera eléctrica. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico. Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, 1995.
- [63] Ministerio De Vivienda y Urbanismo MINVU Chile. Tablas de costos unitarios por metro cuadrado de construcción 4° trimestre 2009. Resolución Exenta N° 8678, de 30 de Diciembre del 2008.
- [64] Ministerio de Salud MINSAL Chile. Reglamento de Calderas y Generadores de Vapor. Decreto N°48, 1984.
- [65] Moran, M.; Shapiro, H.; Fundamentals of engineering thermodynamics. Quinta edición. Hoboken, NJ: Editorial John Wiley & Sons, 2004, pp. 657-661.
- [66] Murgai, M.; Chandra, R.; Boiler operations. Volume 1 of progress in energy auditing and conservation. New Delhi: Editorial New Age International, 2006, pp. 48-51.
- [67] Nakamizo, T.; Kaneda, M.; Hishikawa, S.; Guo, B.; Iwamoto, H.; Nakaoka, M.; “New generation fluid heating appliance using high-frequency load resonant inverter”, Proceedings of the IEEE international conference on power electronics and drive systems PEDS. Volumen 1, Julio 1999, pp. 309-314.
- [68] Otárola, I; Vrignaud, E; “Medición de campo eléctrico y magnético en horno de inducción Maestranza Vespucio”. Informe de proyecto Fondef D051I10098, Agosto 2009, pp 8-11.
- [69] Petchers, N. Combined heating, cooling and power handbook. United States of America: Editorial The Fairmont Press Inc, 2003, pp. 356-358.
- [70] Roman, A.; Heiligenstein, A.; SCR power theory training manual. Chromalox Co., 2002, pp 4-5.
- [71] Rudnev, V.; Loveless, D.; Cook, R.; Black, M.; Handbook of induction heating. United States of America: Editorial Marcel Dekker Inc., 2003, pp. 2-5.
- [72] Sánchez, M. Modelación y control de un sistema piloto de calentamiento de fluidos por inducción magnética. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Eléctrica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2009. pp. 15-41.
- [73] Schlager, E. Evaluación técnica económica de calderas y cogeneración. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, 1993.

- [74] Schwarzer, U.; De Doncker, R.W.; “Power losses of IGBTs in an inverter prototype for high frequency inductive heating applications”, The 27th annual conference of the IEEE industrial electronics society IECON. Volumen 2, Noviembre - Diciembre 2001, pp. 793-798.
- [75] Shand, M. The chemistry and technology of magnesia. New Jersey: Editorial Wiley and Sons, 2006. pp. 121-125.
- [76] Slifka, A.J.; Filla, B.J.; Phelps, J.M.; “Thermal conductivity of magnesium oxide from absolute, steady-state measurements”. Journal of research of the national institute of standards and technology. Volumen 103, N° 4, Julio-Agosto 1998.
- [77] U.S Army Corps of Engineers et al. Unified facilities criteria (UFC). Boiler control systems. Febrero 2001. pp. 7-1 – 7-5.
- [78] Valdés, C. Evaluación de sistema de calentamiento de soluciones mediante inducción magnética en planta de cátodos San Francisco, Los Bronces, Anglo American. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción, 2008.
- [79] Valerio, O. Evaluación energética de la biolixiviación de los sulfuros de baja ley en Anglo American sur, división Los Bronces. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico e Ingeniero Civil en Biotecnología. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Universidad de Chile, 2008.
- [80] Vrignaud, E. Estudio de compatibilidad electromagnética de la electrónica de potencia de un sistema de calentamiento de fluidos por inducción magnética. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2010. pp. 135-136.
- [81] Watt, K. Análisis técnico económico comparativo de tecnologías de calentamiento para la biolixiviación en la minería del cobre. Informe de práctica. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2007. pp. 8-15.
- [82] Yamamoto, M.; Iseki, T.; Kajiyama, A.; Bin, G.; Nakaoka, M.; Uemura, M.; “Latest electromagnetic induction-based fluid-heating equipment using high-frequency PWM load resonant Inverter”. Proceedings of the international conference on power electronics and drive systems. Volumen 1, 26-29 Mayo 1997. pp. 153 - 162.
- [83] Zinn, S.; Semiatin, S.L.; “Coil design and fabrication”. Heat treating magazine, Junio 1988, pp. 32-41.
- [84] Çengel, Y. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. México: Editorial Mc Graw Hill, 2007, tabla A-1, apéndice 1, pp. 842.

[85] Çengel, Y. Ibid, tabla A-16, apéndice 1, pp. 861-862

## **Anexo A. Estudio de Puntos Calientes y Homogeneidad de la Temperatura del Fluido en Calentamiento Resistivo**

El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de los elementos tubulares resistivos de calentamiento de fluidos de pasada, determinar los puntos de máxima temperatura existentes, verificar el nivel de homogeneidad de la temperatura del fluido y en general comprender en mayor profundidad las características técnicas de los calentadores resistivos de pasada.

Para ello, se realizó una serie de simulaciones en el software de multifísica COMSOL v3.5a, el cual tiene la particularidad de resolver numéricamente y de forma integral problemas físicos asociados a un fenómeno particular.

Los calentadores resistivos de pasada (los más usados en aplicaciones de calentamiento de líquidos) se componen de múltiples elementos tubulares que se calientan por efecto de la circulación de una corriente eléctrica en su interior, traspasando directamente el calor al fluido. Cada elemento tubular disipa una potencia en un rango que varía desde unos cientos de watts hasta 10[kW]. La longitud de estos elementos tubulares cambia según la aplicación, así como también el material con el que está compuesta la funda metálica que los cubre. En los casos estudiados sólo se modificó la potencia disipada y la longitud de los elementos tubulares, ya que se desea estudiar el material Incoloy 800 (componente de la funda) debido a que es el material que más resistencia a la corrosión presenta en múltiples aplicaciones.

### **A.1. Descripción de los Elementos**

Se estudiaron y simularon 4 casos de calentamiento con elementos tubulares resistivos, los cuales permiten observar los fenómenos de calentamiento de los elementos tubulares que dependen del flujo y de la potencia disipada.

La geometría y configuración de los elementos es una simplificación de los calentadores resistivos de pasada. Éstos sólo consideran los elementos tubulares de forma paralela en dos dimensiones, por lo que el fluido no presenta todas las turbulencias que se pueden esperar. Sin embargo, los resultados obtenidos, tanto de la temperatura del fluido como de los elementos tubulares, representan bien lo que sucede en la realidad.

En cada caso, el fluido a calentar es agua dentro de una tubería de acero que circula bajo un flujo constante. El diámetro de la tubería cambia en algunos casos para mantener una relación real con el nivel de flujo circulante (mantener una presión hidráulica similar a las aplicaciones reales), y su característica principal es que no permite la transferencia de calor hacia el exterior, es decir sus paredes son adiabáticas.

Como ya se mencionó, los elementos tubulares tienen los mismos materiales constituyentes para cada caso simulado, y varían sólo en su largo y potencia disipada. Cada uno de ellos está diseñado de la siguiente forma (ver Figura A.1):

- Conductor eléctrico interno:
  - Material: Nichrome
  - Diámetro: 13 AWG (1,83[mm])
- Aislante eléctrico:
  - Material: Óxido de Magnesio (MgO) compactado
- Funda metálica:
  - Material: Incoloy 800
  - Diámetro: 12,9 [mm]
  - Espesor: 0,89 [mm]

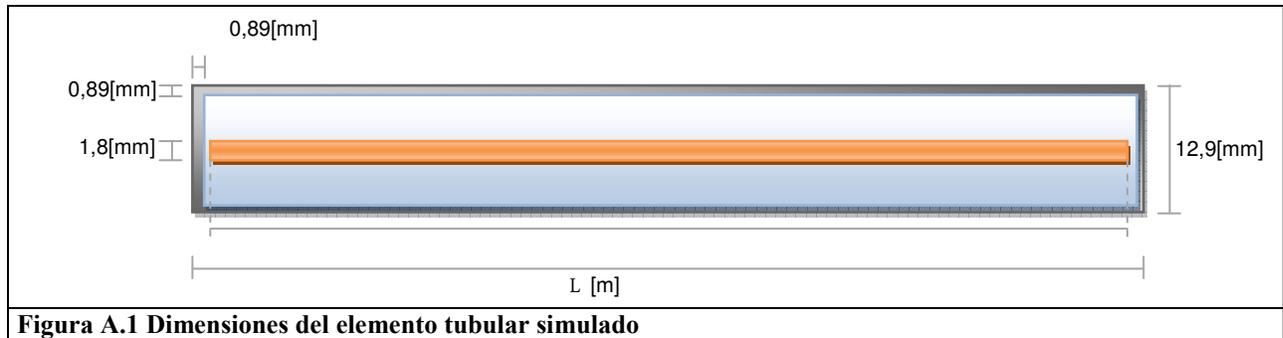
Las características eléctricas y térmicas de los materiales anteriormente mencionados, a 15°C son los que se indican en la Tabla A.1.

**Tabla A.1. Propiedades eléctricas y térmicas de los materiales estudiados.**

	<b>Resistividad [<math>\mu\Omega</math>-cm]</b>	<b>Conductividad térmica [W/m<sup>o</sup>K]</b>	<b>Calor Específico [kJ/kg<sup>o</sup>K]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Nichrome</b>	108	12,4	0,45	8400
<b>MgO</b>	$2,3 \cdot 10^{15}$	40,5	0,92	3550
<b>Incoloy 800</b>	98,9	11,2	0,46	7940

Estas características varían según la temperatura a la que se encuentren, según las funciones programadas en COMSOL.

Las dimensiones del elemento tubular se observan en la Figura A.1.



**Figura A.1 Dimensiones del elemento tubular simulado**

El rectángulo interior corresponde a la representación del conductor eléctrico, el cual es cubierto por el aislante eléctrico MgO. El rectángulo exterior representa la funda metálica cubriendo a todo el elemento. Las dimensiones corresponden a los valores estándar que manejan los fabricantes especializados de elementos resistivos para calentamiento. Se tomó en consideración 2 valores de longitud L. El primero de ellos (1,1[m]) corresponde a la longitud de los elementos tubulares que en conjunto conforman un calentador resistivo de pasada de 500[kW]. La potencia máxima que disipa un elemento tubular para esta longitud es de 10[kW]. La segunda longitud corresponde al máximo valor estándar con que se fabrican éstos elementos, que es de 3,5[m].

El agua del estudio posee las características indicadas en la Tabla A.2 (las cuales también varían con la temperatura):

**Tabla A.2. Características del agua**

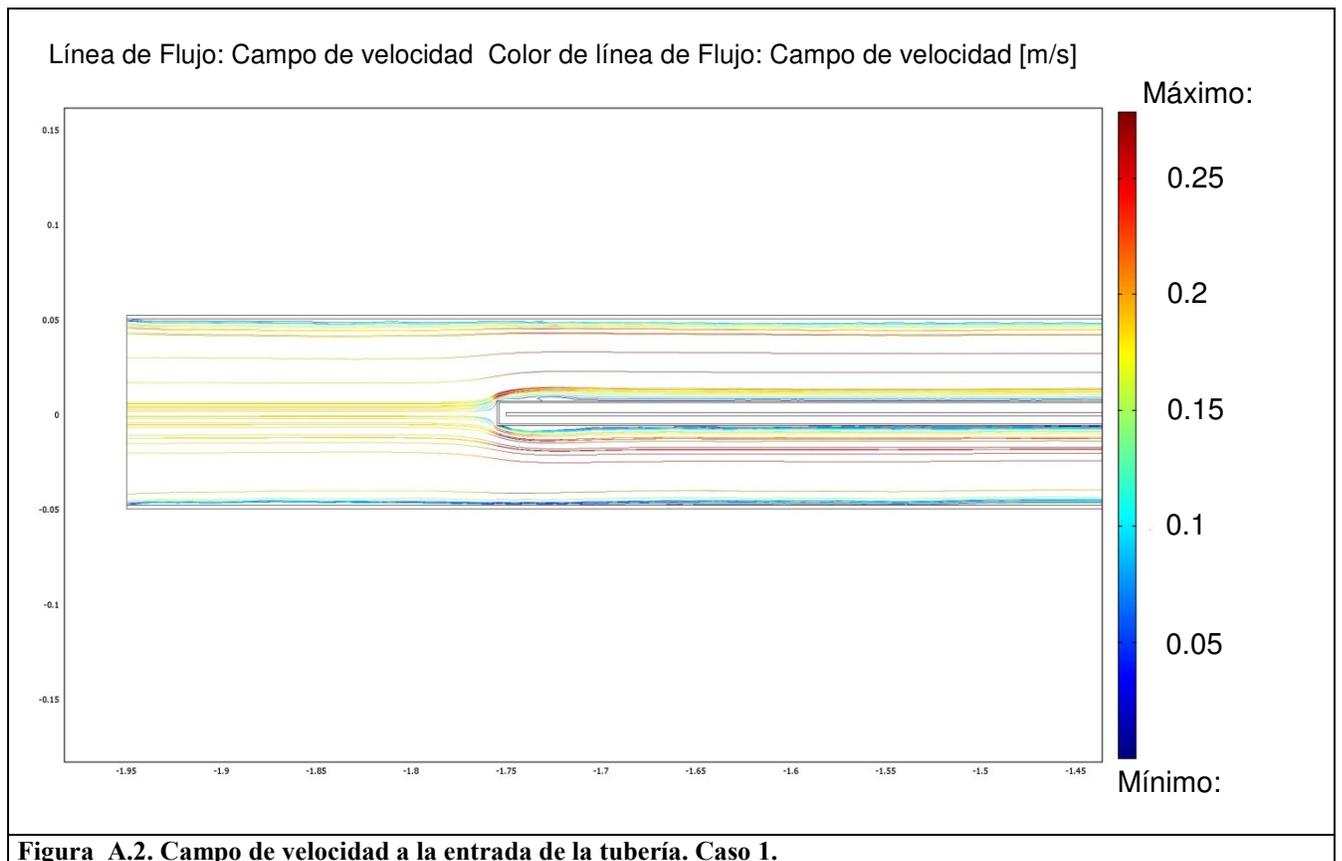
	Temperatura inicial [°C]	Calor Específico [kJ/kg°K]	Conductividad Térmica [W/m°K]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad Dinámica [kg/m s]
Agua	15	4,186	0,589	999,1	1,138 10 <sup>-3</sup>

Las simulaciones se resolvieron numéricamente analizando el estado estacionario del fenómeno. A continuación se muestran los casos estudiados con sus parámetros.

## A.2. Caso 1: Flujo de 83 [l/min]. Potencia entregada: 4[kW].

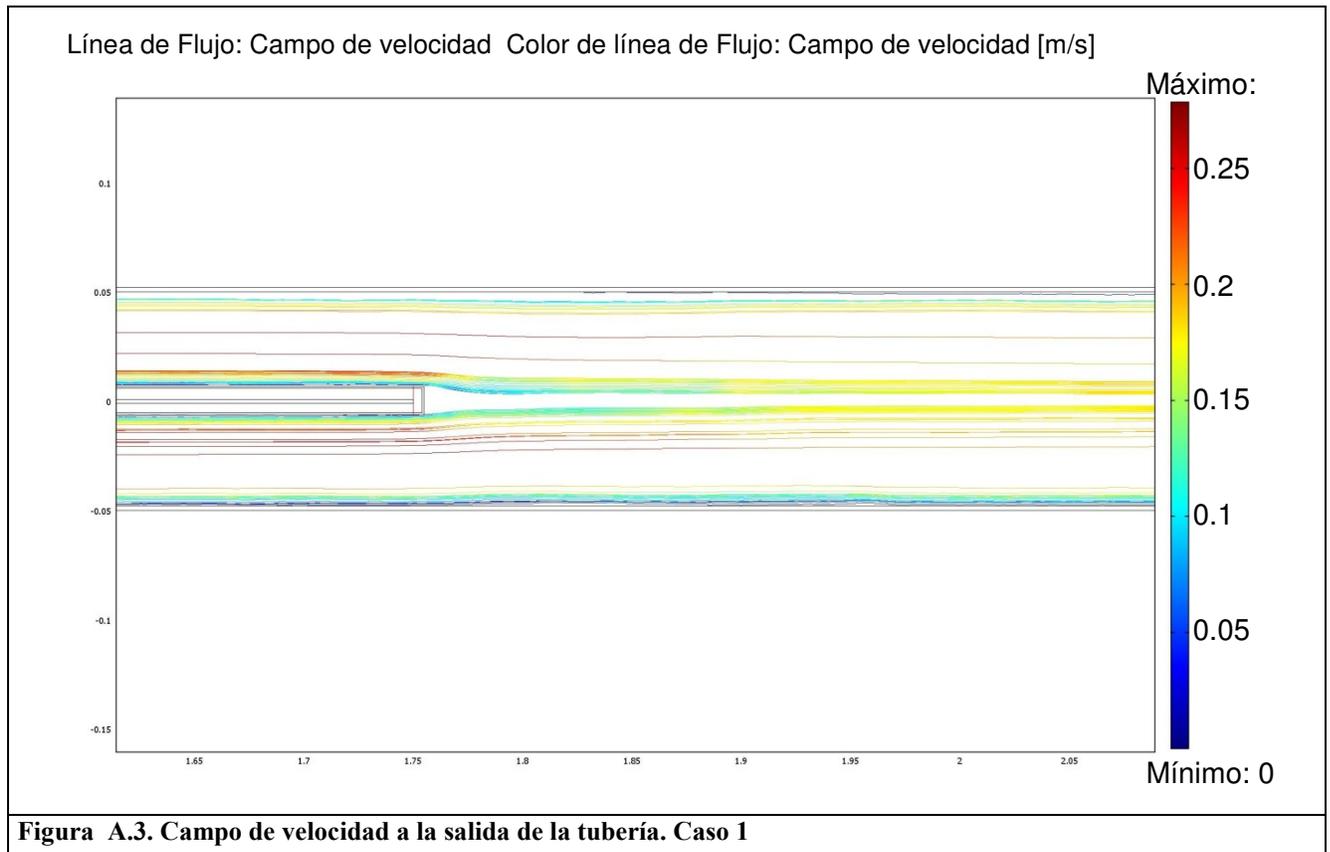
Este caso sirvió como referencia para los posteriores casos. Se simula el calentamiento del agua fluyendo por una tubería de 98[mm] de diámetro interno, con una resistencia de longitud 3,5[m]. Esta longitud es la más larga que se puede encontrar fabricada de manera estándar, y se espera que la temperatura del elemento tubular sea baja y el fluido laminar. La velocidad de entrada del fluido es de 0,1841[m/s] de izquierda a derecha en el plano de la figura, tal como se muestra en la Figura A.2.

### i. Distribución de velocidad dentro de la tubería.



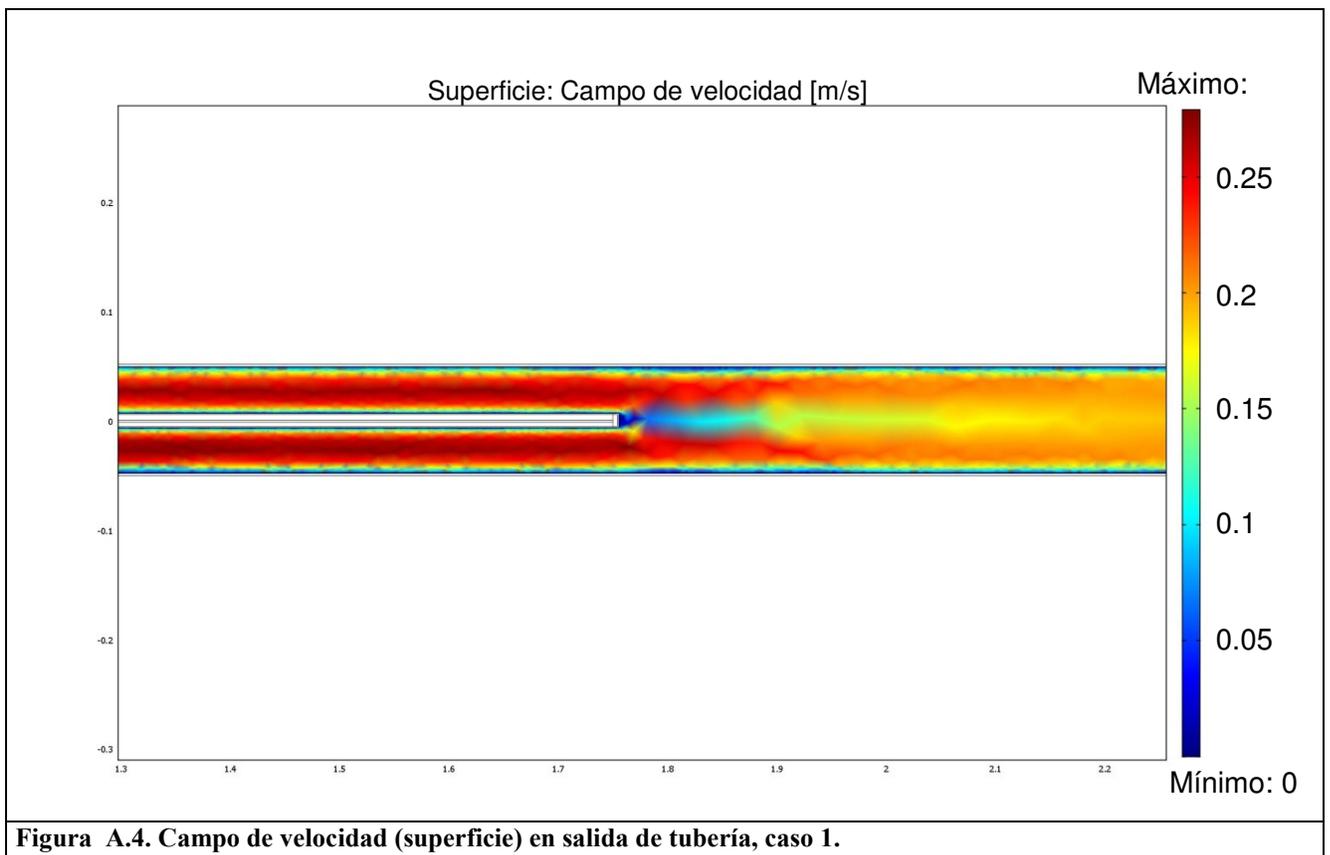
La Figura A.2 muestra la sección inicial de la tubería simulada donde se aprecia una diferencia de velocidad del fluido al interior de la tubería. La velocidad de entrada es de 0,1841[m/s], y el fluido se mueve de izquierda a derecha. Las zonas azules adyacentes a las paredes de la tubería y del elemento tubular muestran que el fluido prácticamente no se desplaza debido a las fuerzas de resistencia entre el fluido y una superficie. El aumento de velocidad en la zona entre las paredes de la tubería y el elemento tubular (líneas rojas) es debido al aumento de presión a la que se somete el fluido en dicha zona. El aumento de velocidad promedio del fluido en esa zona es de un 40%. El aumento de

presión en esta zona (referencial) es de 0,14 milibares. Desde la salida de la tubería hasta la entrada de la misma la diferencia de presión es de 0,32 milibares.



**Figura A.3. Campo de velocidad a la salida de la tubería. Caso 1**

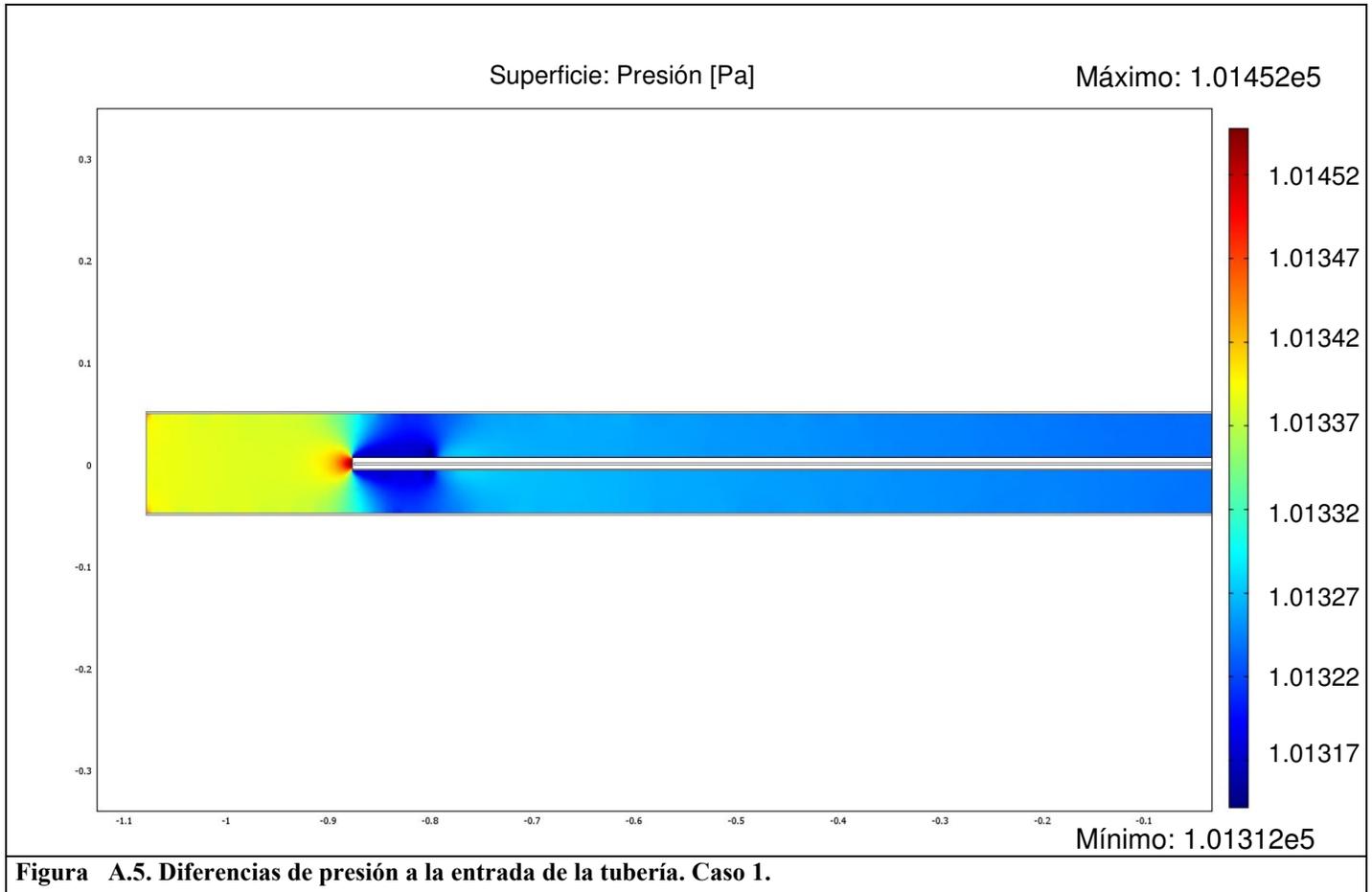
La Figura A.3 muestra como a la salida de la tubería el fluido retoma su valor inicial de velocidad. Se puede apreciar también la característica laminar de este fluido. En la zona media del elemento tubular –la cual no se muestra por razones de espacio– la velocidad permanece constante a lo largo del tubo, encontrándose una variación sólo en la dirección transversal.



**Figura A.4. Campo de velocidad (superficie) en salida de tubería, caso 1.**

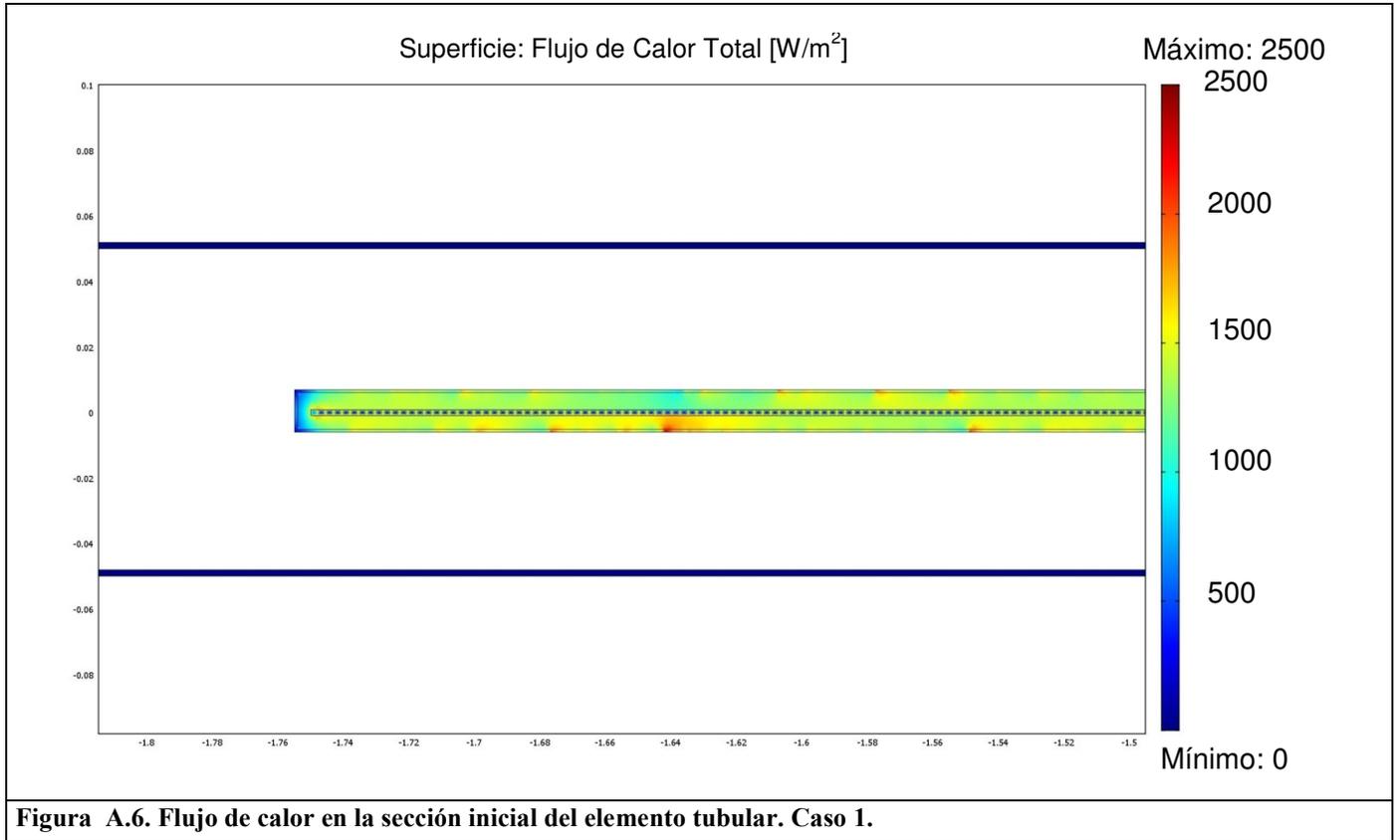
La Figura A.4 muestra la velocidad del fluido en la sección final de la tubería. Se aprecia que en la zona central la velocidad es menor debido al obstáculo sólido que corresponde al elemento tubular, y luego de 45[cm] de recorrido desde el final del elemento tubular, la distribución transversal de la velocidad en el interior de la tubería logra uniformarse. A diferencia de la Figura A.3, la Figura A.4 muestra claramente la distribución casi uniforme de la velocidad del fluido a la salida de la tubería.

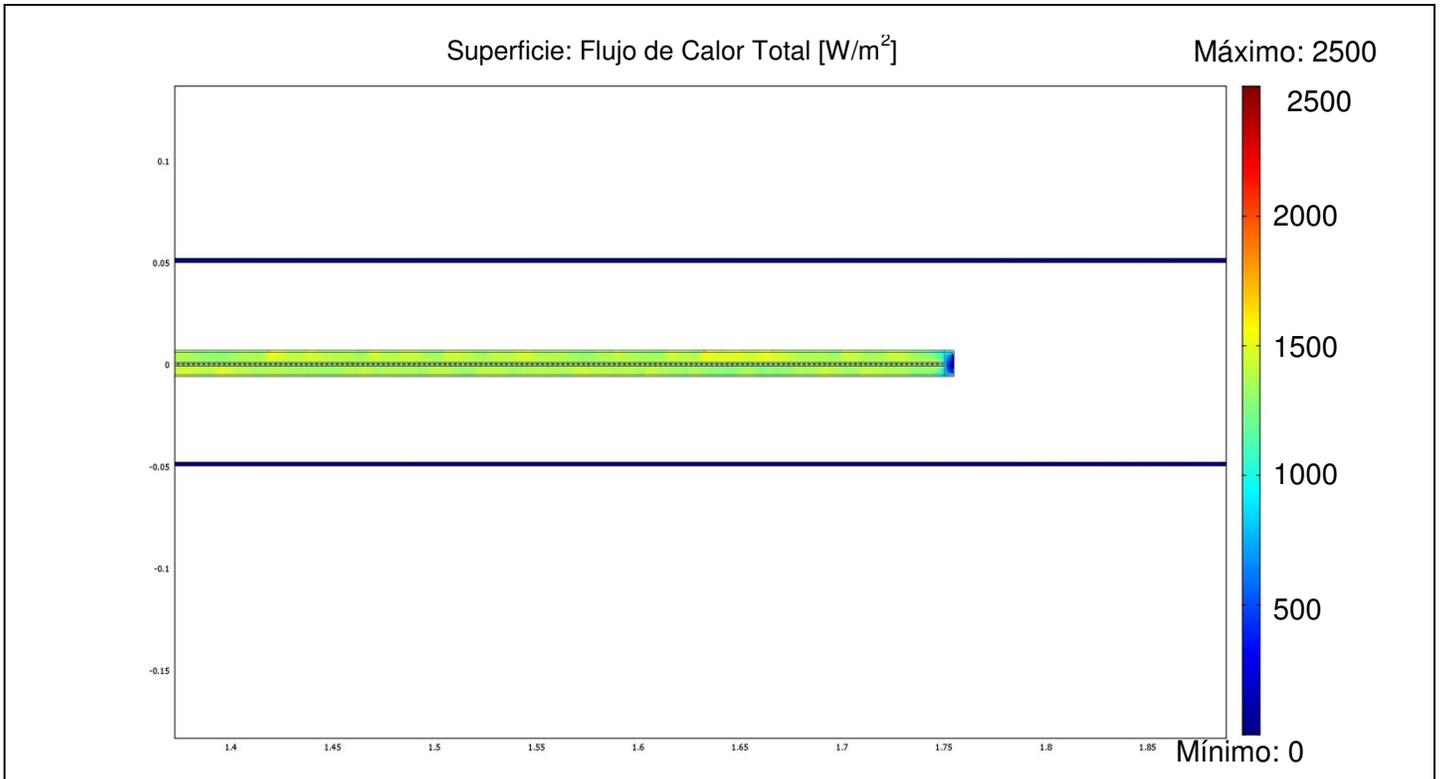
## ii. Diferencias de presión



De la Figura A.5 se puede apreciar que la diferencia de presión que provoca el elemento tubular es mínima (40[Pa]), por lo cual la configuración de este elemento no provocaría alteraciones hidráulicas en una línea instalada.

iii. Distribución del flujo de calor en los elementos tubulares.



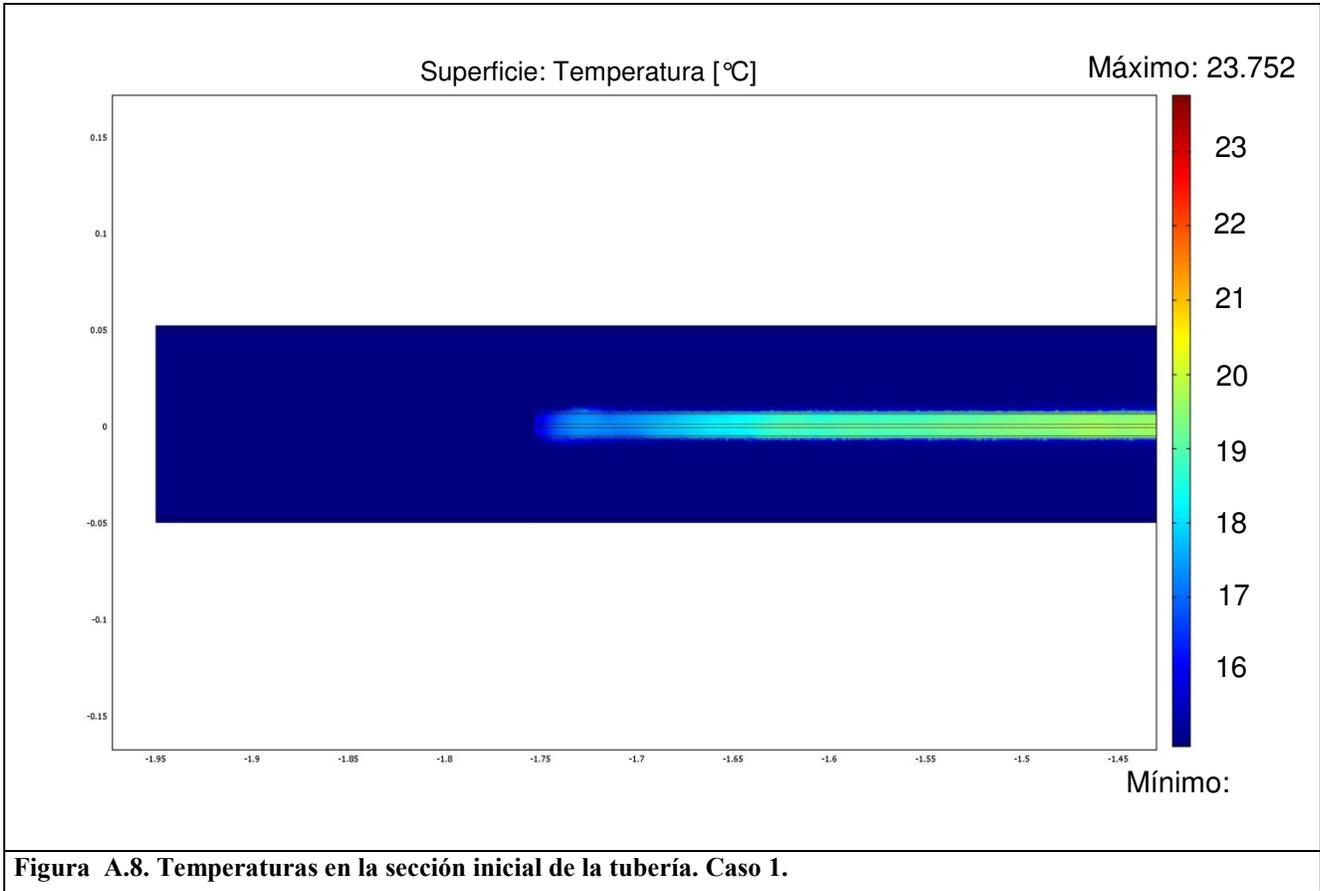


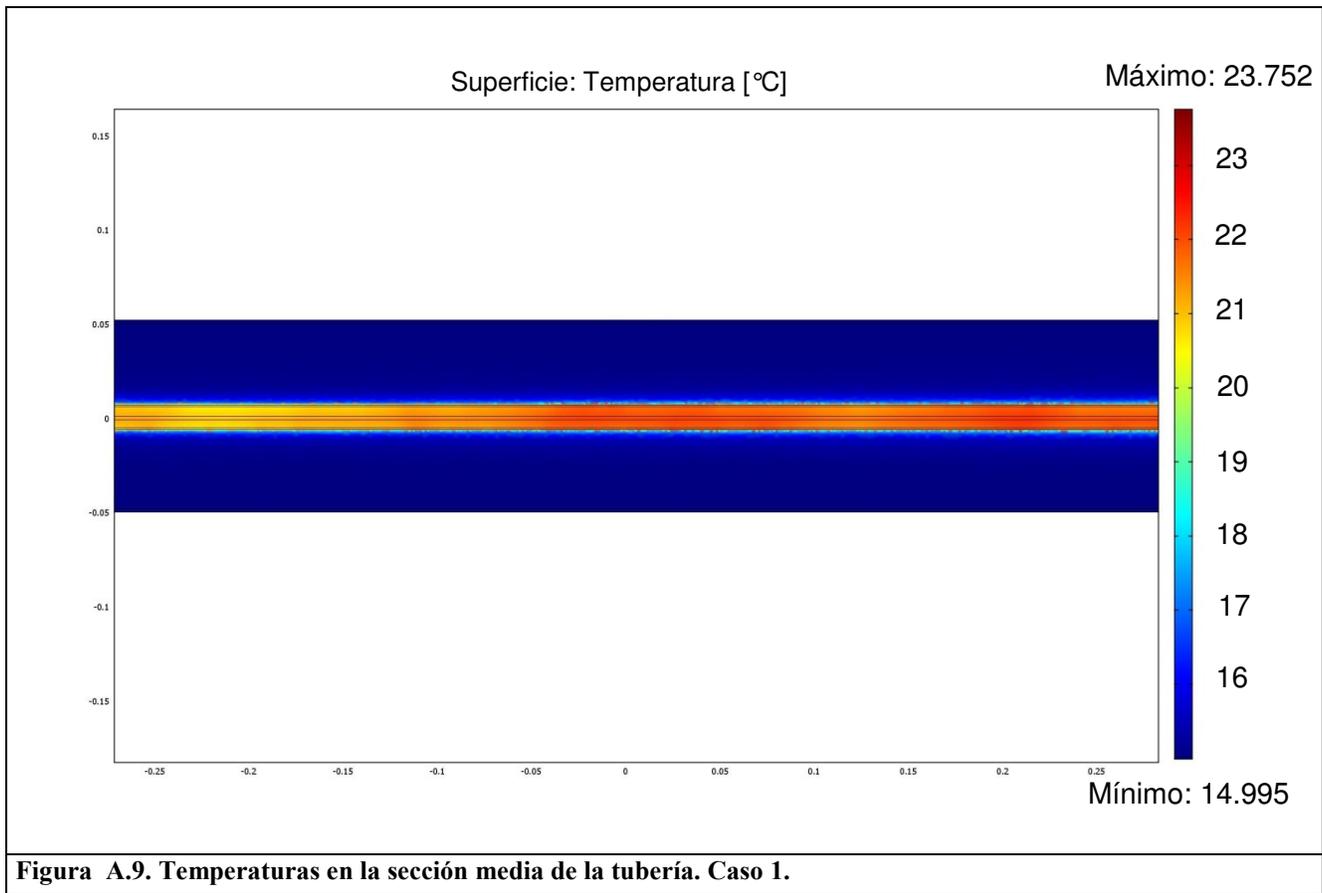
**Figura A.7. Flujo de calor en la sección final del elemento tubular. Caso 1.**

Las Figuras A.6 y A.7 grafican cómo se distribuye el flujo de calor por el elemento tubular. Se logra apreciar que en los extremos existe muy poco flujo de calor debido a que el conductor eléctrico posee una geometría recta, lo cual disipa calor sólo en la dirección normal a éste, es decir, en la dirección “y” o transversal, y además el conductor simulado posee un par de milímetros menos de longitud que el elemento tubular. El diseño del conductor en un elemento real tiene una geometría tipo espiral, lo cual genera un flujo de calor en la dirección longitudinal con respecto al elemento tubular, logrando una mayor uniformidad del flujo de calor en toda su superficie.

Se concluye de estos gráficos que la forma espiral permite tener una longitud mayor de conductor eléctrico dentro del elemento tubular, lo que permite aumentar la resistencia eléctrica del elemento (disminuyendo la sección de conductor) y en consecuencia el calor disipado, con lo que se logra uniformar el flujo de calor en todo el elemento tubular. Los puntos con mayor flujo de calor que presenta la Figura A.7 se debe a que la malla de resolución en esos puntos es gruesa (contiene pocos nodos) lo que provoca la generación de puntos con mayor flujo de calor, lo que se logra eliminar aumentando el número de nodos en la zona.

iv. Distribución de temperaturas.





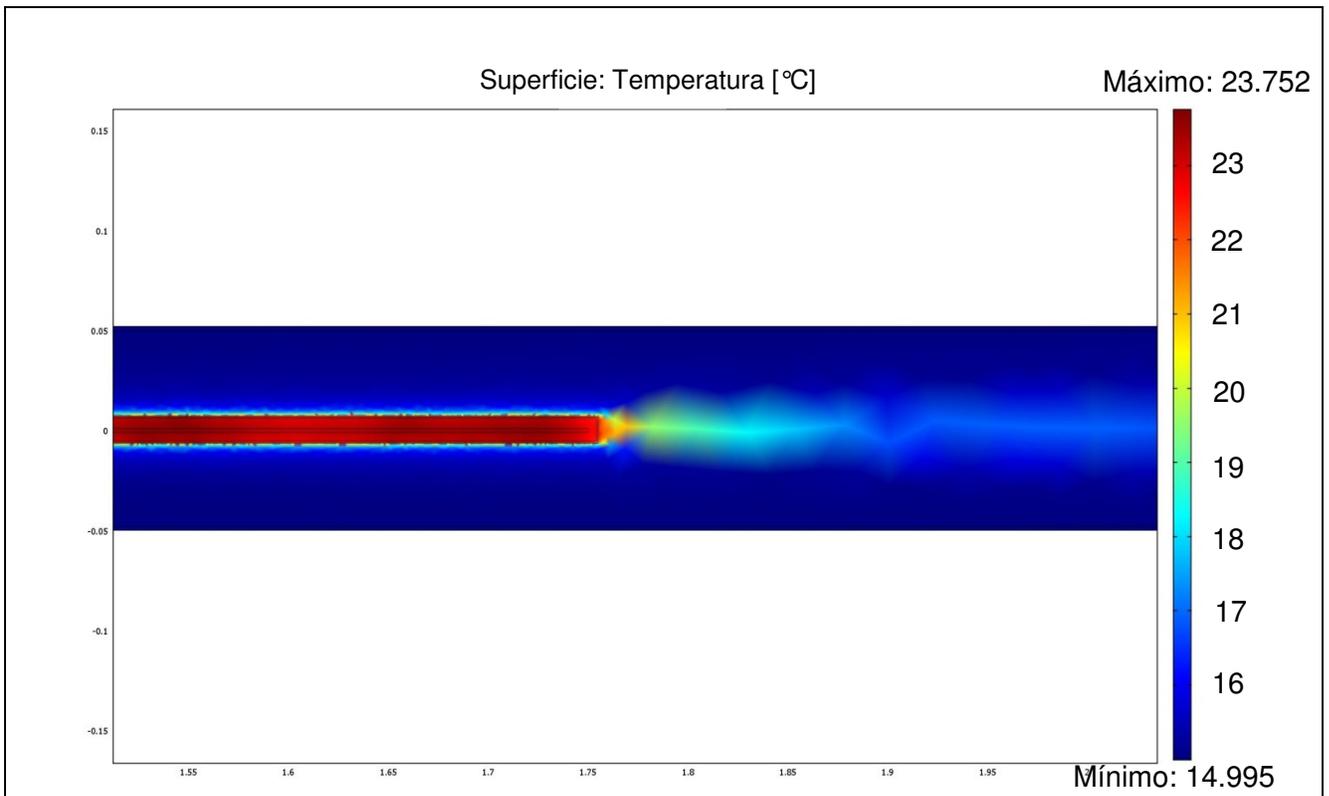


Figura A.10. Temperaturas en la sección final de la tubería caso 1,.

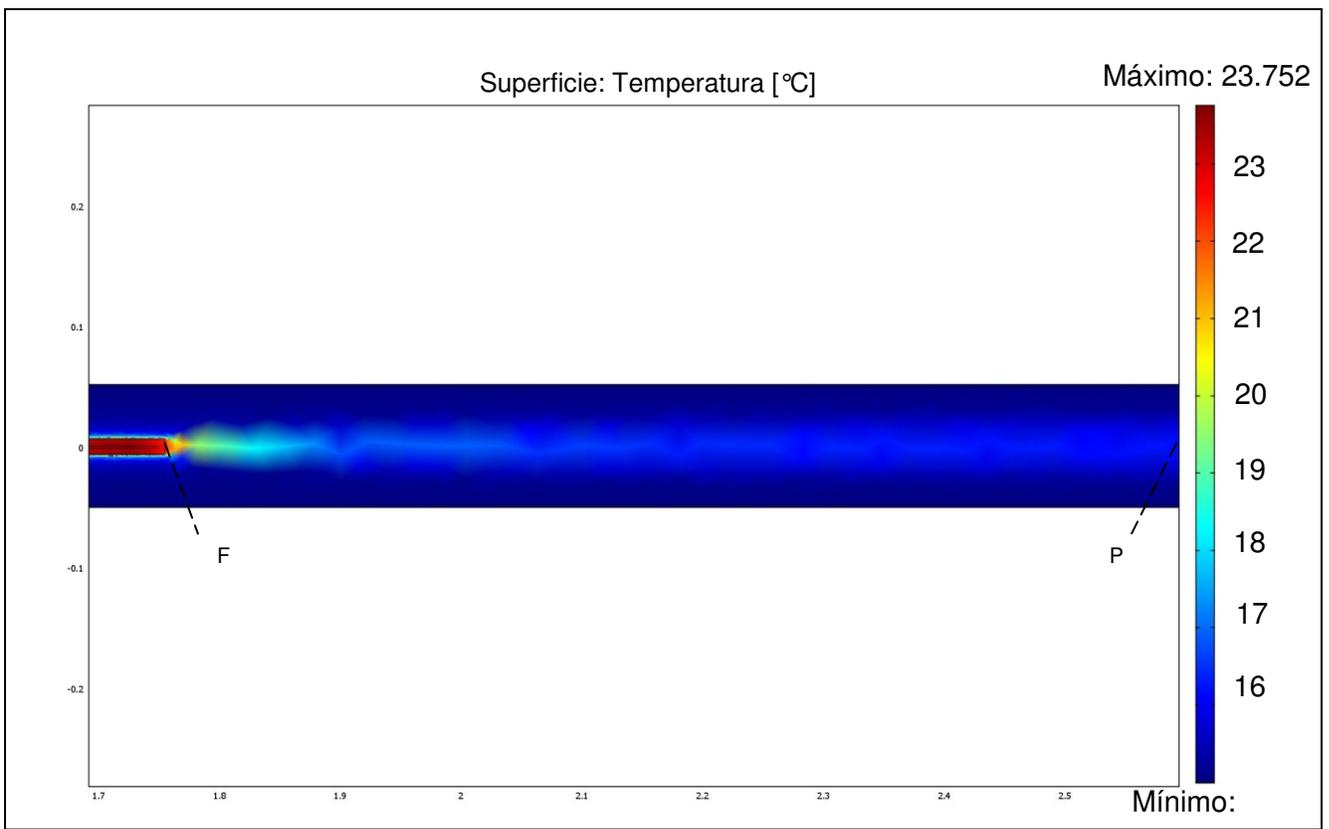
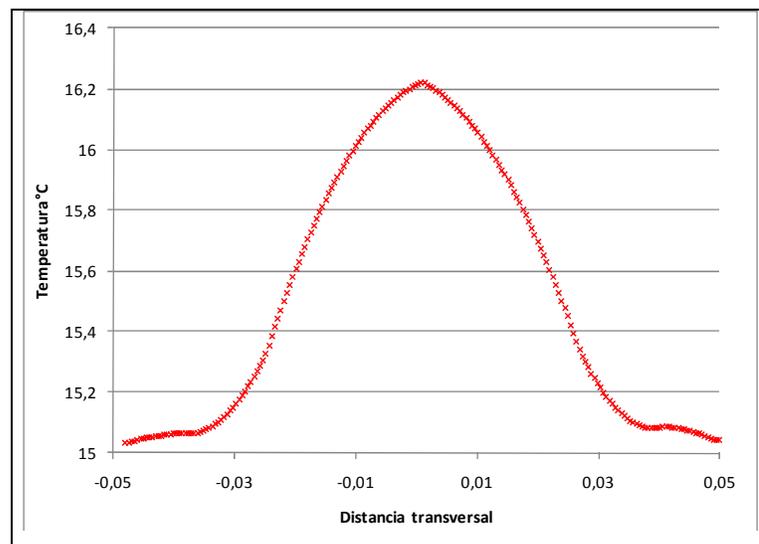


Figura A.11. Temperaturas a la salida de la tubería. Caso 1.

Las Figuras A.8, A.9, A.10 y A.11 muestran que la temperatura del elemento tubular de calentamiento no es uniforme a lo largo de ella, sino que va en aumento desde la temperatura inicial de 15°C en el extremo izquierdo (entrada del flujo de agua) hasta los 23,7°C en su extremo derecho. Se puede apreciar en las cuatro figuras anteriormente mencionadas que en la zona de la interfaz entre el agua y la funda metálica existe un aumento de la temperatura del agua. Este efecto se explica por la condición de no desplazamiento que existe entre el agua y la funda metálica, lo que provoca un aumento de la temperatura del agua por conducción. Este efecto tiene importantes consecuencias, ya que para flujos de calor importantes, la temperatura de esta zona puede llegar por sobre los 100°C, pudiendo provocar burbujas de vapor de agua, que en ciertas aplicaciones puede provocar cavitaciones en el interior de la tubería de acero. Además, si el agua no está debidamente tratada, los minerales e impurezas se depositan formando una capa de mineral que recubre exteriormente todo el elemento tubular. Esta capa opera como una componente adicional del elemento tubular, causando elevaciones de temperatura en el interior del mismo, disminuyendo la vida útil con la que es diseñada.

La temperatura del agua es muy desigual en el tramo final y a la salida de la tubería, sin embargo tiende a uniformarse conforme se desplaza hacia la salida de la tubería. En la Figura A.12 se muestra un gráfico de la temperatura del agua en un corte transversal en la salida de la tubería, a 90[cm] del extremo final del elemento tubular, marcado como punto “P”, como se aprecia en la Figura A.11.

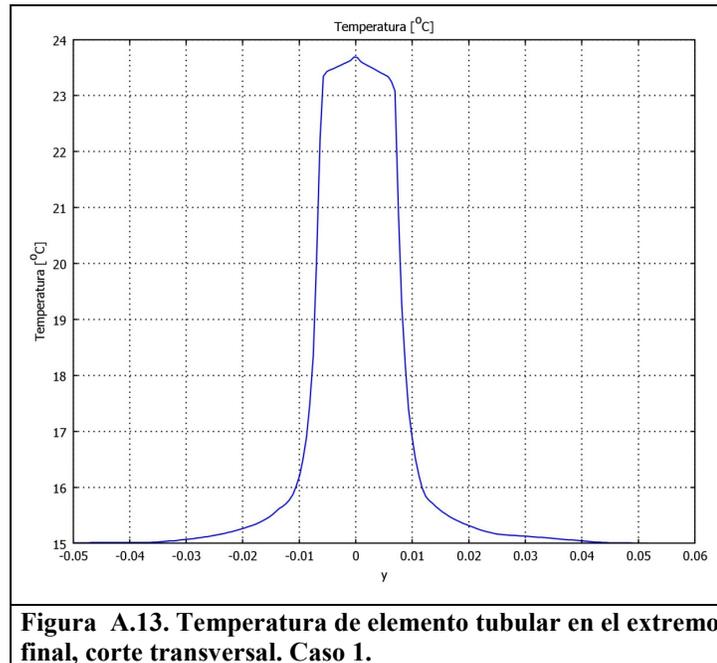


**Figura A.12. Distribución de temperatura del fluido a la salida de la tubería, corte transversal. Caso 1.**

La Figura A.12 muestra que el agua en el centro se encuentra mucho más caliente que el resto, debido a que existe sólo un elemento tubular de calentamiento y casi nula turbulencia. Esta

distribución se va uniformando cada vez más a medida que el agua avanza por la tubería por el mecanismo de convección. La temperatura promedio del fluido es de  $15,68[^\circ\text{C}]$ , y el elemento tubular disipa  $4,156[\text{kW}]$ .

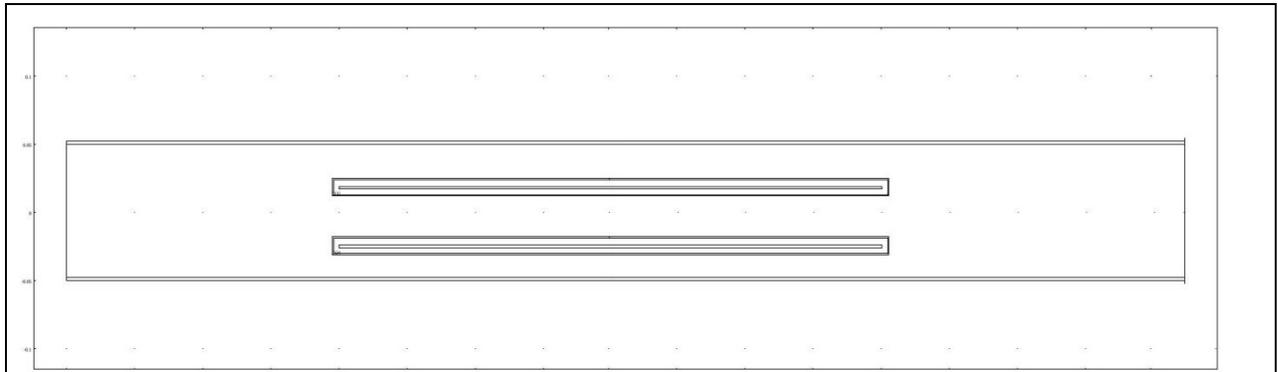
La temperatura del elemento tubular en su extremo final, punto “F” de la figura A.11, se observa en la Figura A.13.



La Figura A.13 muestra un corte transversal que ilustra la distribución de la temperatura tanto del agua como del elemento tubular justo en el punto donde se encuentra el máximo de temperatura del elemento tubular. Entre  $y=-0,05$  e  $y=-0,006$  corresponde a agua, luego la temperatura corresponde al elemento tubular. Los cambios de pendiente corresponden a los cambios de diferentes materiales. Se aprecia que el interior del elemento tubular tiene sólo unas pocas decimas más de temperatura que su superficie externa.

### **A.3. Caso 2: Flujo de 83 [l/min]. Potencia entregada: 40[kW].**

Se simula el calentamiento del agua fluyendo por una tubería de  $98[\text{mm}]$  de diámetro interno, con dos resistencias de longitud  $1,1[\text{m}]$  dispuestas en paralelo y entregando  $20[\text{kW}]$  de calor cada una. La configuración se muestra en la Figura A.14.

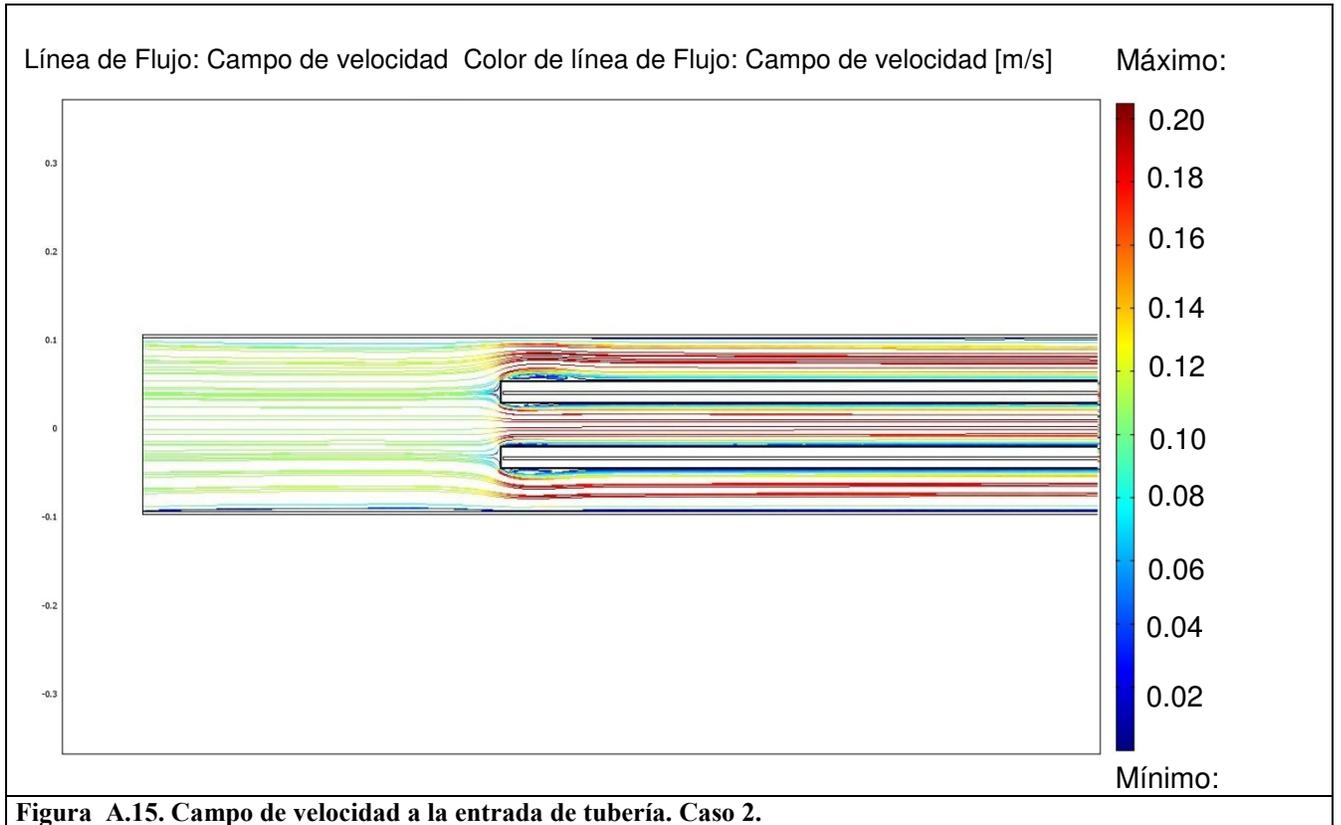


**Figura A.14. Configuración de dos elementos tubulares en paralelo.**

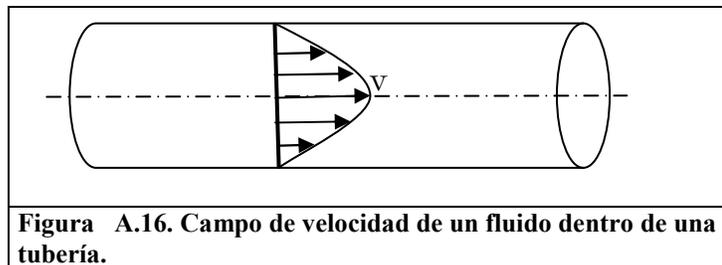
La distancia de separación entre los elementos tubulares en paralelo es de 2,4[cm], que es la misma distancia que los separa de las paredes de la tubería. La velocidad de entrada del agua es de 0,1841[m/s].

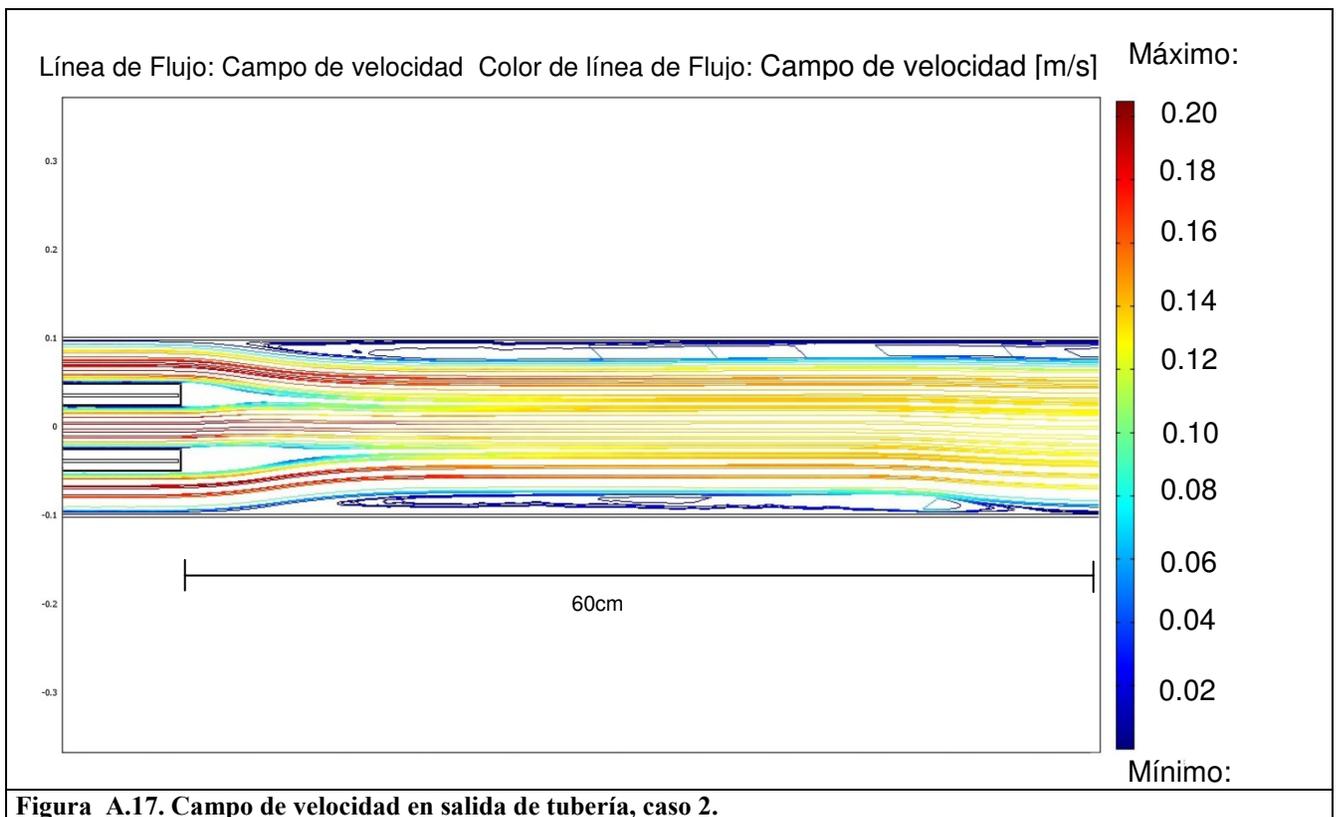
En este caso se espera que ambos elementos tubulares se encuentren a la misma temperatura (ya que entregan el mismo flujo de calor por unidad de longitud) y que la distribución de la temperatura al final de la tubería sea más uniforme que en el caso anterior, debido a que el calor se entrega de manera más uniforme que en el Caso 1 y además deben existir mayores turbulencias provocadas por los 2 elementos tubulares.

**i. Distribución de velocidad dentro de la tubería.**

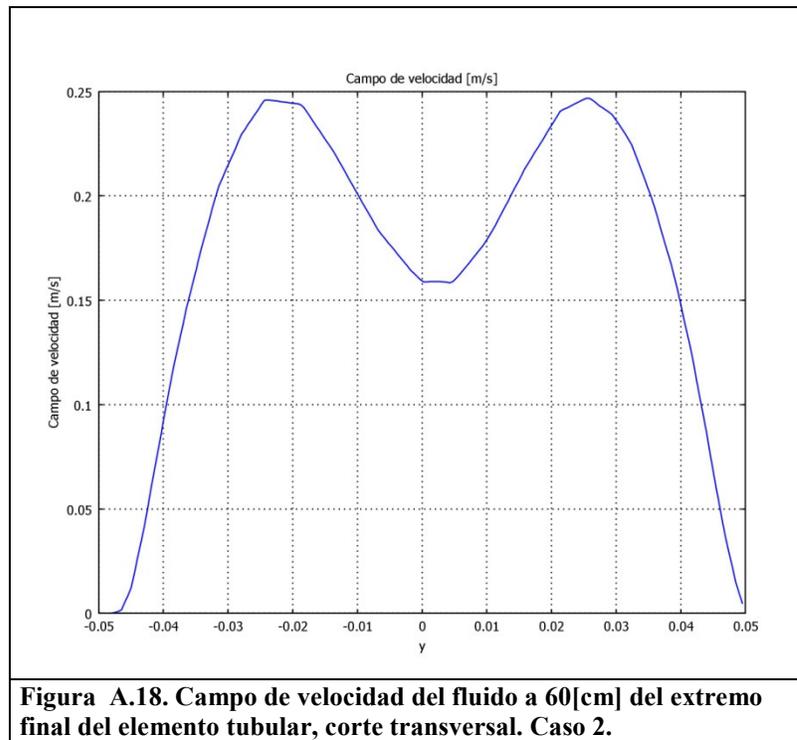


La Figura A.15 muestra la velocidad inicial del fluido de  $0,1841[m/s]$  entrando a la tubería y enfrentando los dos elementos tubulares como obstáculos. Existe un aumento de la velocidad del flujo de alrededor de un 10-12% entre los elementos tubulares en relación a su velocidad de entrada, y si bien la distribución espacial de los elementos tubulares es simétrica, existe una asimetría leve de la velocidad del fluido entre los elementos tubulares. Esto se debe a que el fluido que recorre el espacio entre las paredes de la tubería y los elementos tubulares viaja más lento que el fluido entre los elementos tubulares, ya que el campo de velocidad natural de un fluido dentro de una tubería es más rápido en el centro de éste, tal como lo muestra la Figura A.16, debido a la condición de no desplazamiento del fluido en las paredes.





La Figura A.17 muestra que el fluido presenta una distribución desigual de la velocidad a una distancia de 60[cm] del extremo final de los elementos tubulares. La zona central del fluido se vuelve más lenta que la más cercana a las paredes, debido a las diferencias de presiones que se producen al converger los 3 fluidos en un mismo punto. Luego de 90[cm] el fluido se vuelve un poco más homogéneo en velocidad. La Figura A.18 muestra un grafico de la velocidad transversal a 60[cm] del extremo final del elemento tubular, que muestra la desigual distribución de velocidad observada en la Figura A.17.



**Figura A.18. Campo de velocidad del fluido a 60[cm] del extremo final del elemento tubular, corte transversal. Caso 2.**

**ii. Diferencias de presión.**

Las diferencias de presión encontradas en el caso 2 también son mínimas, con una diferencia entre de 22[Pa] entre el punto mínimo y máximo.

iii. Distribución del flujo de calor en los elementos tubulares.

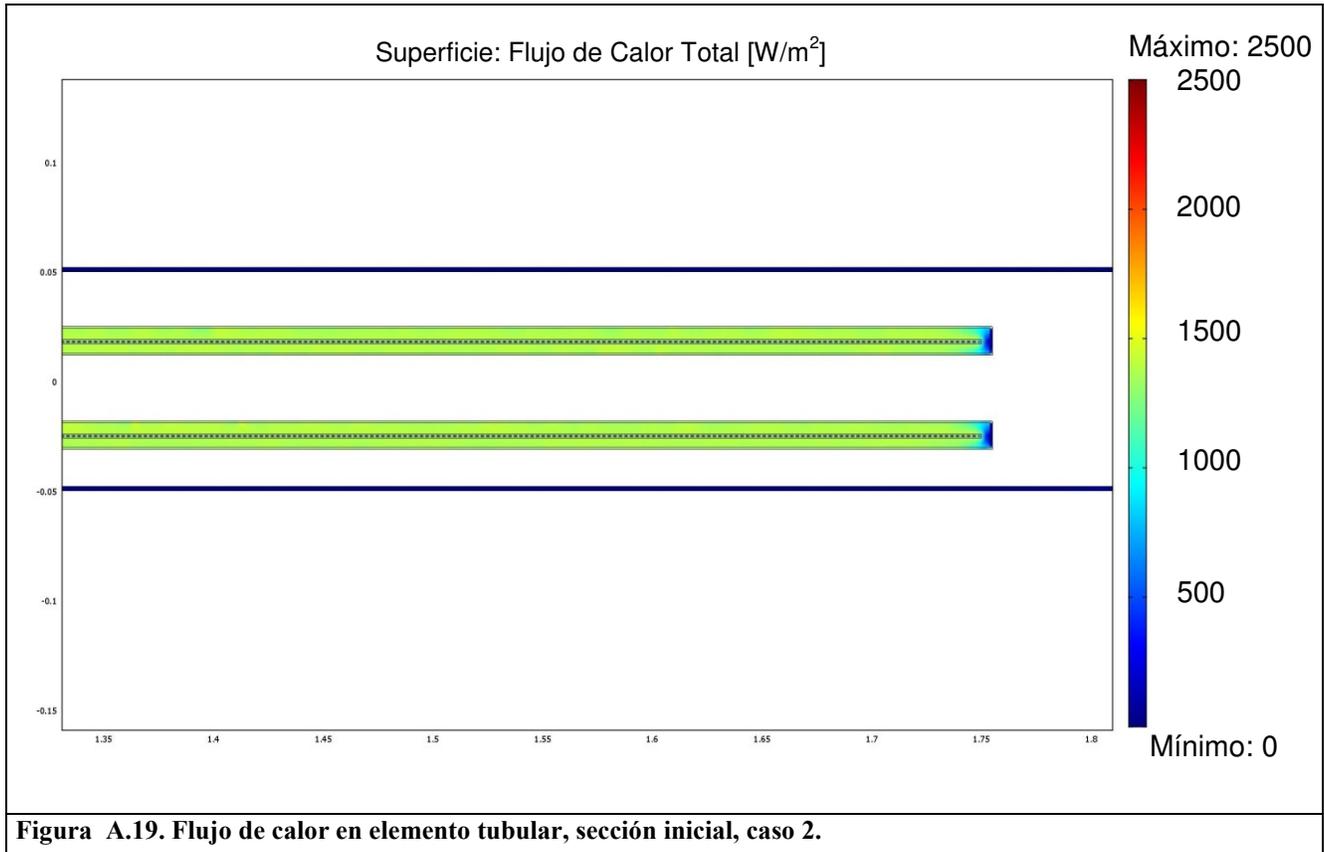


Figura A.19. Flujo de calor en elemento tubular, sección inicial, caso 2.

La Figura A.19 muestra que el flujo de calor es uniforme en cada uno de los elementos tubulares, al igual que en el Caso 1. Se observa que en los extremos se tiene el mismo fenómeno que en el caso anterior, donde el flujo de calor es menor. Esto confirma que el calor es entregado de manera uniforme al agua (excepto en los extremos).

#### iv. Distribución de temperaturas.

A continuación se muestran las temperaturas alcanzadas por los elementos tubulares y por el agua.

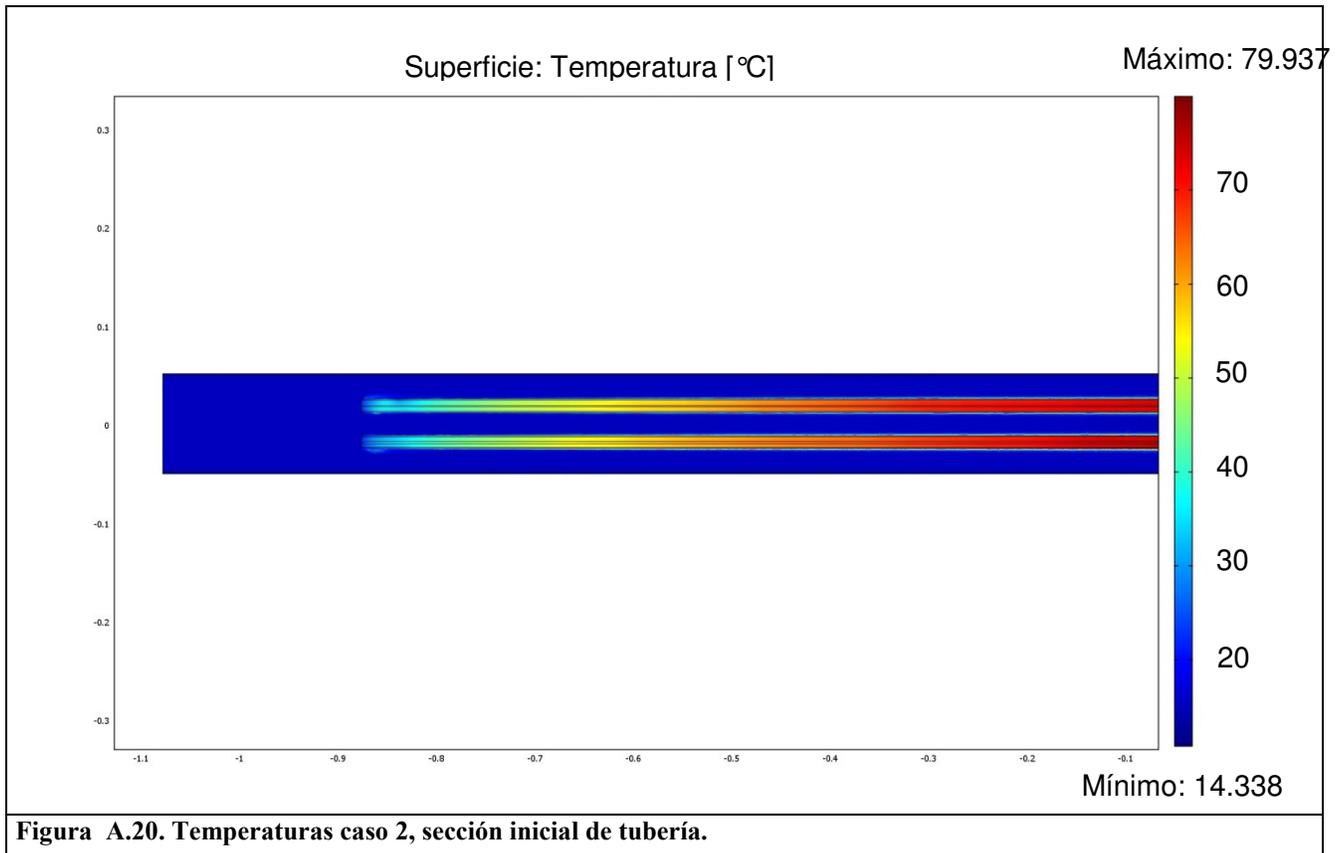
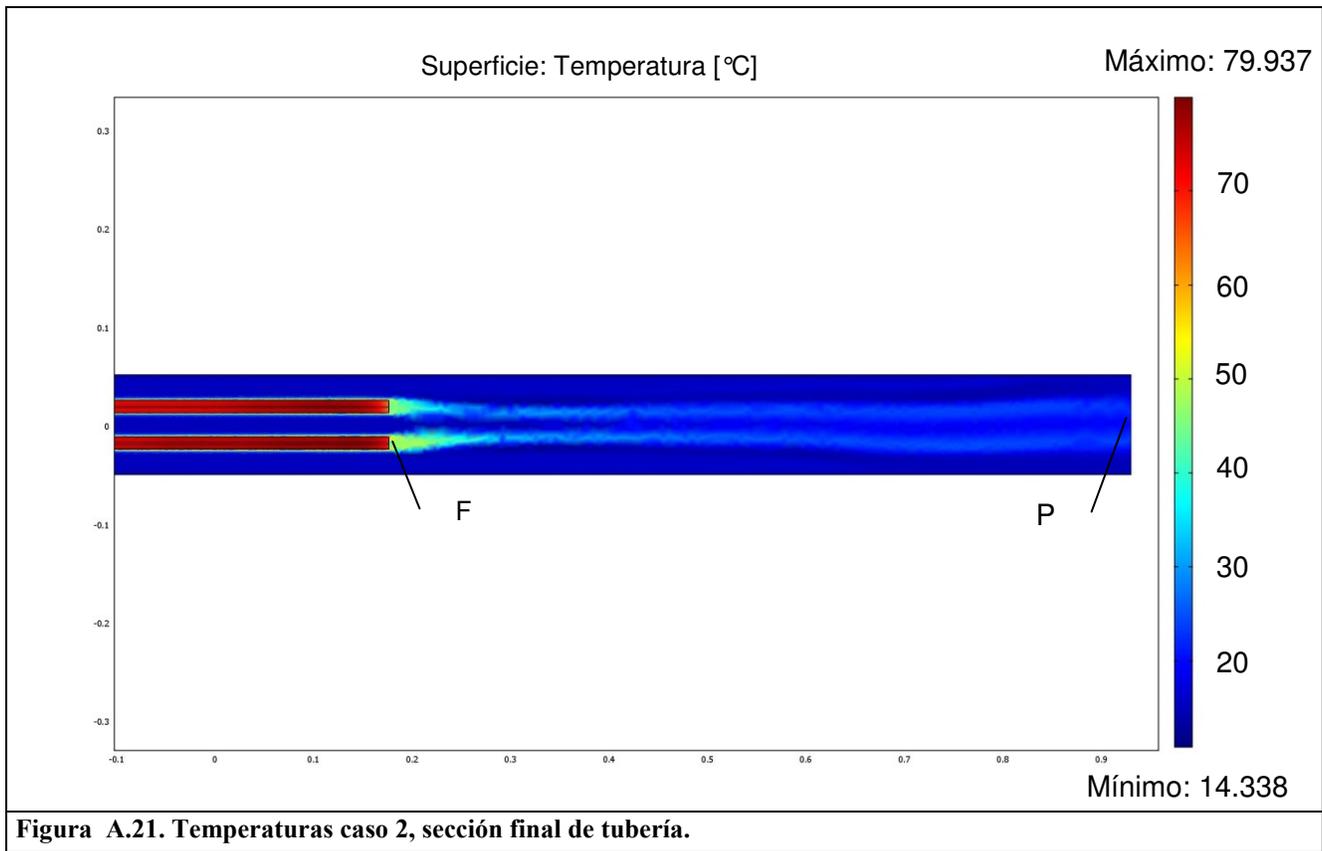


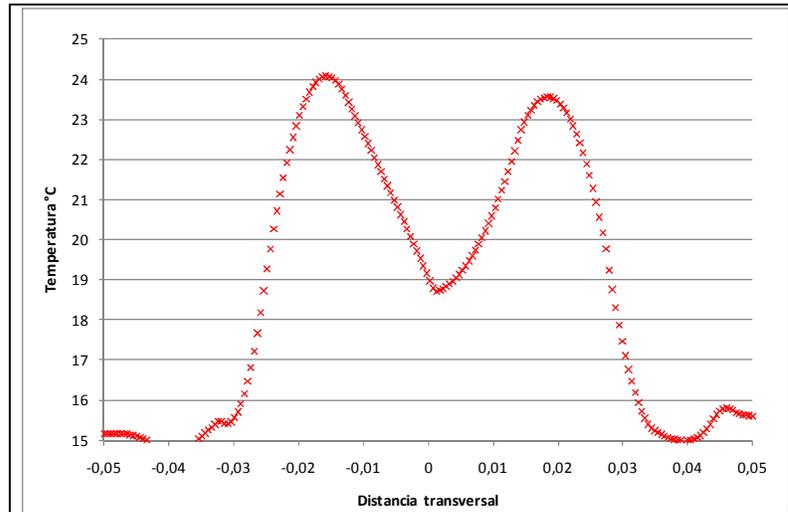
Figura A.20. Temperaturas caso 2, sección inicial de tubería.

En la Figura A.20 se observa el mismo comportamiento de la temperatura que en el Caso 1. Los elementos tubulares tienen una distribución no uniforme de su temperatura a lo largo de ellos. La temperatura máxima alcanzada por los elementos tubulares en su extremo final es de 79,9°C.



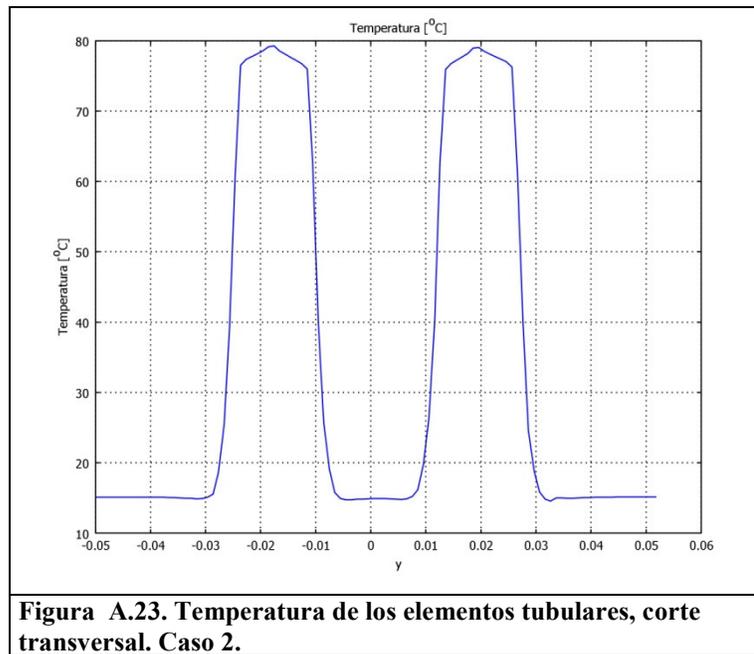
De la Figura A.21 se observan dos franjas de agua caliente muy marcadas, cuya temperatura máxima se encuentra justo después de los elementos tubulares, en el punto “F”, alcanzando un nivel entre 45 y 50°C. Se espera entonces que al bajar el flujo de agua, la temperatura en estas zonas llegue cerca de los 100°C pudiendo provocar burbujas de vapor de agua. Este efecto generalmente es indeseado en los procesos de calentamiento de fluidos debido a que puede provocar cavitaciones en las tuberías u otros efectos en los procesos posteriores.

La distribución de temperaturas en el agua al final de la tubería (a 90[cm] desde el extremo final de los elementos tubulares, punto “P”) se muestra a continuación en la Figura A.22.



**Figura A.22. Distribución de temperatura del fluido a la salida de la tubería, corte transversal. Caso 2.**

En la Figura A.24 se puede observar claramente la influencia de los dos elementos tubulares en paralelo. Al igual que en la Figura A.12, se aprecia una distribución muy poco uniforme de la temperatura del fluido, marcada por la configuración de los dos elementos. La asimetría que se observa se explica por la leve diferencia de velocidades presentes en el fluido. Debido a que el fluido tiene la capacidad de aumentar su temperatura un poco más que en las zonas más rápidas, según la ley que rige el calentamiento  $\Delta T = \dot{Q} / \dot{m} C_p$ . La temperatura media del agua es de 18,79[°C] desde el gráfico de la Figura A.22 y la potencia total disipada por ambos elementos es de 21,96[kW].



**Figura A.23. Temperatura de los elementos tubulares, corte transversal. Caso 2.**

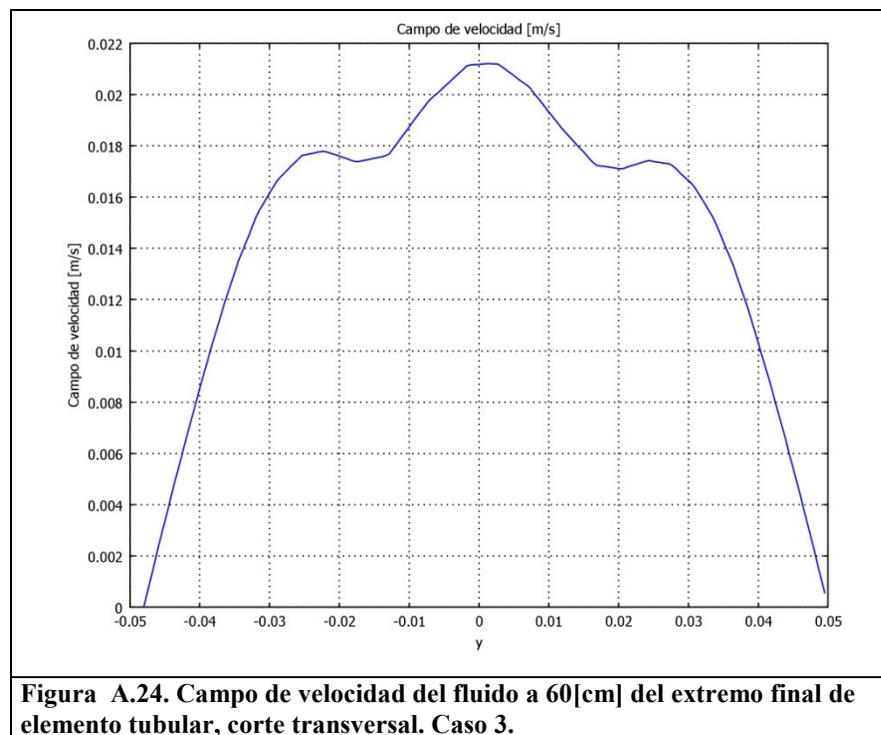
En la Figura A.23 se observa la temperatura de los elementos tubulares en su extremo final. La temperatura de ambas es similar, y tal como en el Caso 1 las variaciones de las pendientes de la temperatura muestran claramente los cambios de materiales. Se observa que la temperatura máxima es superior al Caso 1, debido a que individualmente la potencia disipada en este caso por cada elemento es levemente superior. Con este nivel de potencia los elementos tubulares no aumentan demasiado su temperatura interna, y sabiendo que los materiales tienen un punto de fusión muchísimo más alto que la temperatura máxima de la Figura A.23, se puede inferir que bajo estas condiciones los elementos tubulares no deberían fallar por un sobrecalentamiento en el largo plazo.

#### A.4. Caso 3: Flujo de 8 [l/min]. Potencia entregada: 20[kW].

Se simula el calentamiento del agua fluyendo por una tubería de 98[mm] de diámetro interno, con dos resistencias de longitud 1,1[m] puestas en paralelo y entregando 10[kW] de calor cada una. La idea principal es estudiar los cambios en las temperaturas dado en cambio en el nivel del flujo de agua. La configuración de los elementos tubulares es la misma que en el Caso 2, así como también las condiciones iniciales. La velocidad de entrada del fluido es de 0,0184[m/s], correspondiente a los 8[l/min]. La geometría corresponde a la presentada en la Figura A.14.

##### i. Distribución de velocidad dentro de la tubería.

Los resultados de la simulación presentada en la Figura A.24 muestran la misma forma de campo de velocidad en la entrada que en el Caso 2 (Figura A.15 y A.17), con un aumento de velocidad mayor (50-60%) en comparación al caso mencionado en la zona entre los elementos tubulares. En el centro de la tubería se puede encontrar una velocidad mayor que cercana a las paredes, tal como se aprecia en la Figura A.24.



**Figura A.24. Campo de velocidad del fluido a 60[cm] del extremo final de elemento tubular, corte transversal. Caso 3.**

La distribución de velocidades que se muestra en la Figura A.28 se vuelve más uniforme a la salida de la tubería. Se espera que estas diferencias de velocidades tengan efectos sobre la distribución de la temperatura en el fluido, lo que es corroborado en la sección a continuación.

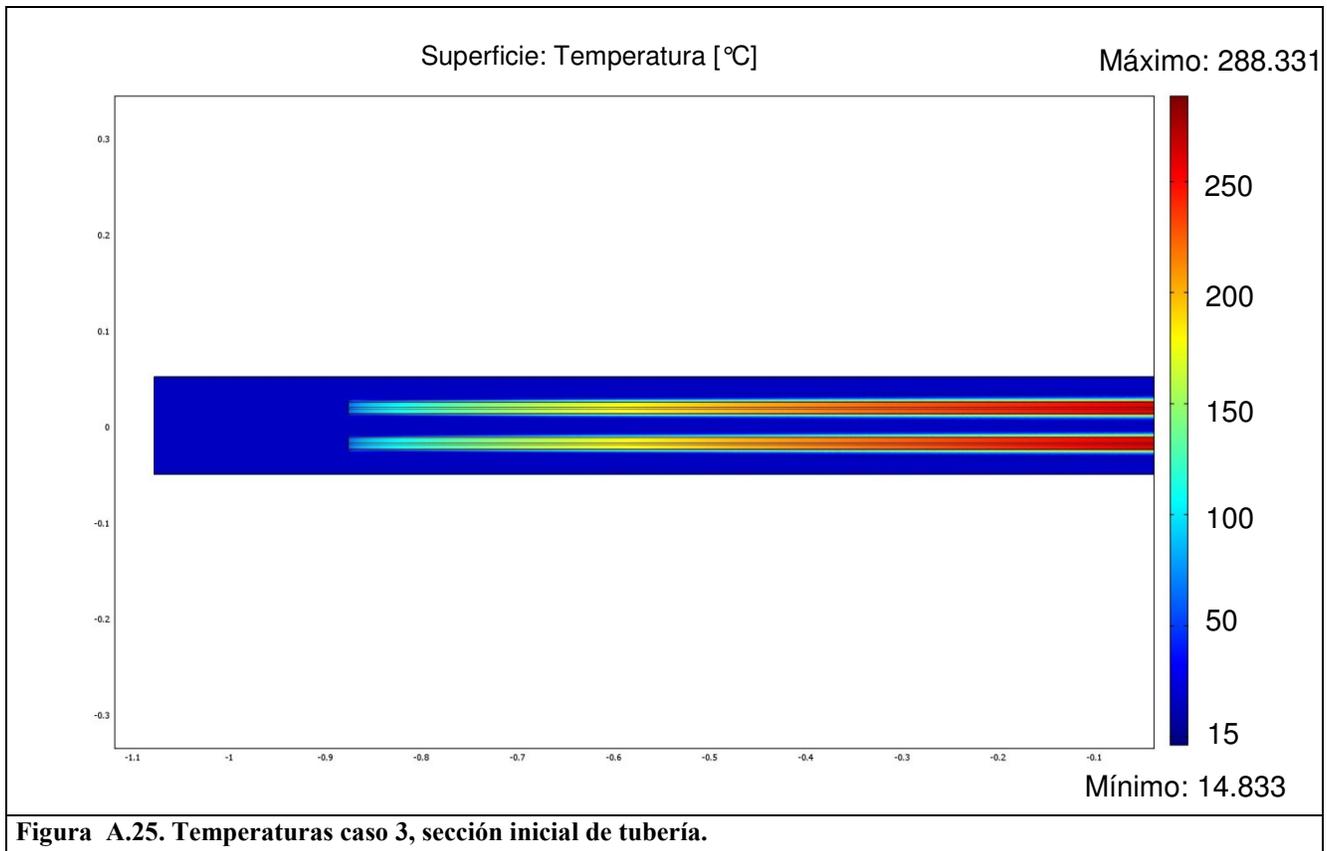
**ii. Diferencias de presión.**

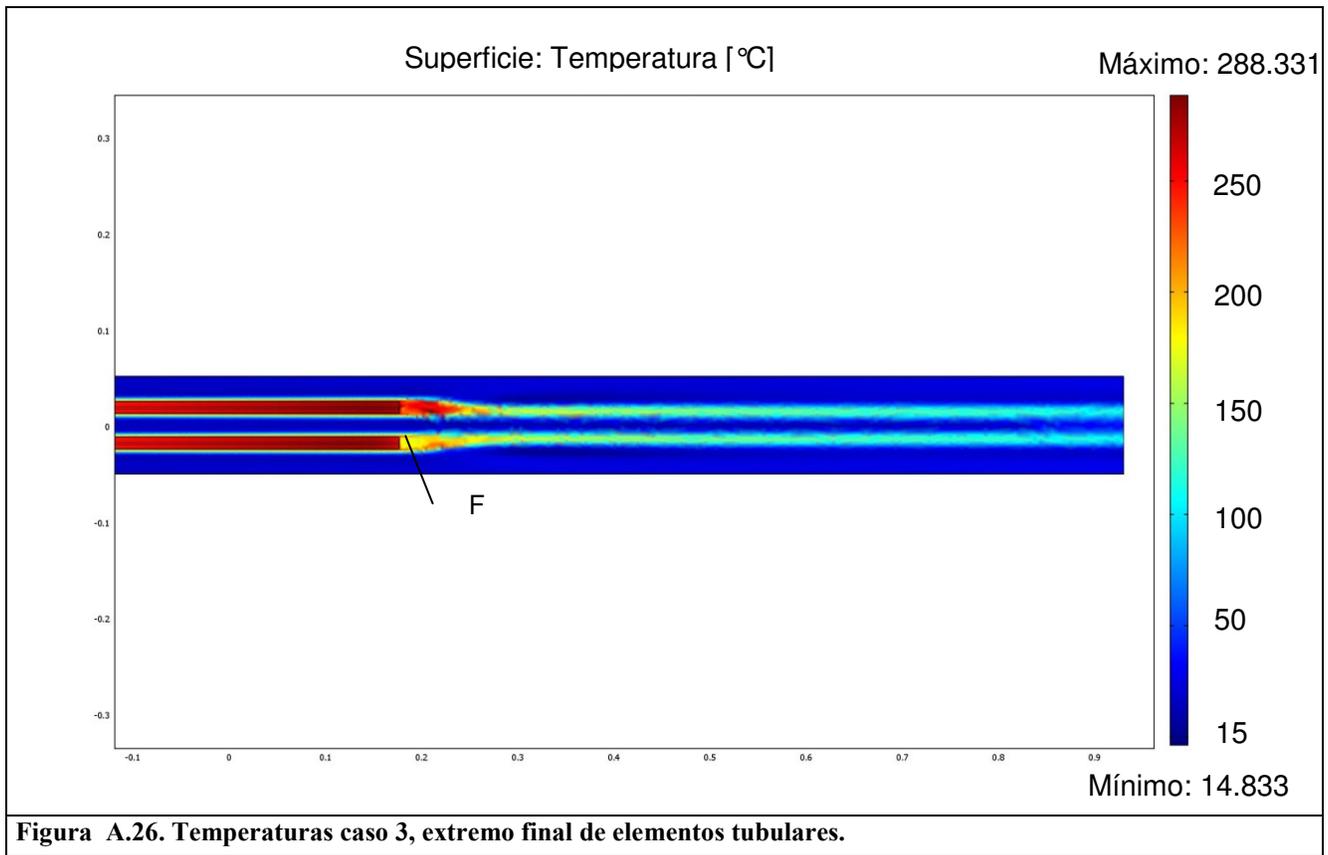
Las diferencias de presión en las simulaciones son similares a las observadas en el Caso 2 y no merecen mayores observaciones.

**iii. Distribución del flujo de calor en los elementos tubulares.**

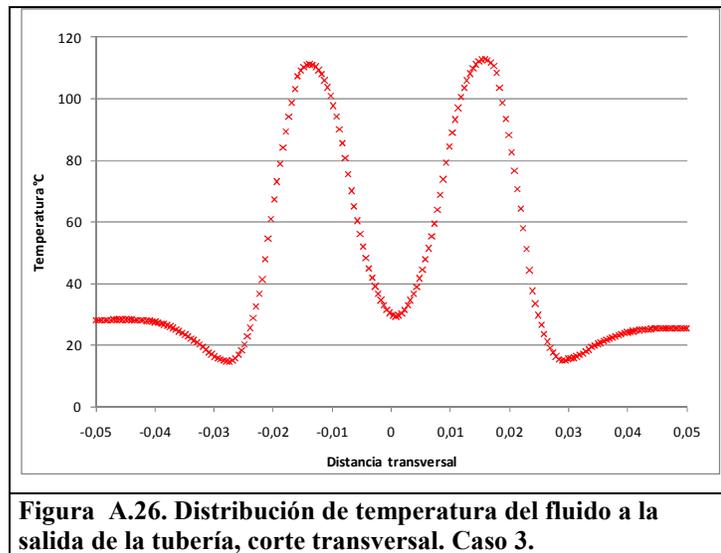
La distribución del flujo de calor en los elementos tubulares es similar a la observada en la Figura A.19 y no merecen mayores observaciones.

**iv. Distribución de temperaturas.**





La Figura A.25 muestra un aumento de la temperatura del extremo inicial de los elementos tubulares mayor al Caso 2 (Figura A.20) tal como se esperaba. Esto se debe exclusivamente al menor flujo de agua que circula por el interior de la tubería. El agua, al ser mala conductora del calor y una menor velocidad en el interior de la tubería que en el Caso 2, tiene una menor capacidad de retirar calor desde los elementos tubulares lo que provoca el aumento de temperatura. En la Figura A.26 se observa que la distribución de temperatura del agua en la zona del extremo final de los elementos tubulares (punto “F”) posee una forma similar al del Caso 2 (Figura A.21), con 2 líneas de flujo marcadamente más calientes que el resto. La temperatura máxima de los elementos tubulares es alta (288°C), lo que si bien está lejos de la temperatura de fusión de los materiales, si provoca un envejecimiento prematuro, disminuyendo la vida útil de los elementos. Además, se observa que la temperatura del fluido está por sobre los 100°C en las mencionadas franjas, es decir que en este caso hay una producción de vapor de agua importante.



De la Figura A.26 se distingue una distribución muy desigual de la temperatura del fluido, sin embargo simétrica. Nuevamente la configuración de los 2 elementos en paralelo se refleja en la distribución de la temperatura, al igual que en caso anterior (Figura A.22). La temperatura promedio del fluido es de  $47,11^{\circ}\text{C}$  y la potencia entregada es de  $18,63[\text{kW}]$ .

### Comentarios.

En los Casos 2 y 3 se puede apreciar que la distribución de la velocidad dentro de la tubería no es uniforme, incluso si el fluido es del tipo laminar. Esta distribución no uniforme de la velocidad provoca que la distribución de la temperatura en el fluido sea también no uniforme. Se pueden encontrar dos franjas marcadamente más calientes que el resto del fluido, reflejando la configuración de los elementos tubulares. Esta mala distribución se acentúa a medida que la potencia de los elementos tubulares aumenta, o bien el flujo del fluido disminuye. Es por ello que se requiere de una gran cantidad de elementos tubulares para obtener una distribución de temperatura más uniforme, por lo que se requiere de un diámetro mayor de tubería para no provocar aumentos de presión importantes en el fluido.

Los elementos tubulares presentan una distribución no uniforme de su temperatura en el sentido longitudinal, encontrando un aumento no lineal a lo largo de éste. La temperatura máxima se encuentra en el extremo final del elemento, y para las potencias simuladas, no presentan problemas para los materiales, ya que éstas se encuentran muy lejos de las temperaturas de fusión, sin embargo pueden provocar una disminución de la vida útil de los elementos.

Las diferencias de presión encontradas en las simulaciones son mínimas, pero claramente representan sólo el caso ideal, ya que no se está tomando en cuenta factores como la entrada del fluido en  $90^\circ$  que requieren los calentadores resistivos de pasada, y que sin duda aumentan la presión interna.

### A.5. Caso 4: Simulación Calentador Resistivo de pasada de 50[kW]

El presente caso tiene como objetivo verificar el mecanismo de calentamiento de un calentador resistivo de pasada, simulado con 5 elementos tubulares de 10[kW] cada uno, y con entrada de agua en ángulo recto con respecto a la circulación del fluido. Se desea ver los cambios de presión entre la entrada y la salida del calentador, las turbulencias generadas y las temperaturas alcanzadas por los elementos tubulares y el agua.

El calentador resistivo se compone de una carcasa aislada térmicamente, cinco elementos tubulares de calentamiento como los utilizados en las anteriores simulaciones, y con una entrada del fluido en ángulo recto con respecto a la salida. La Figura A.27 muestra sus dimensiones.

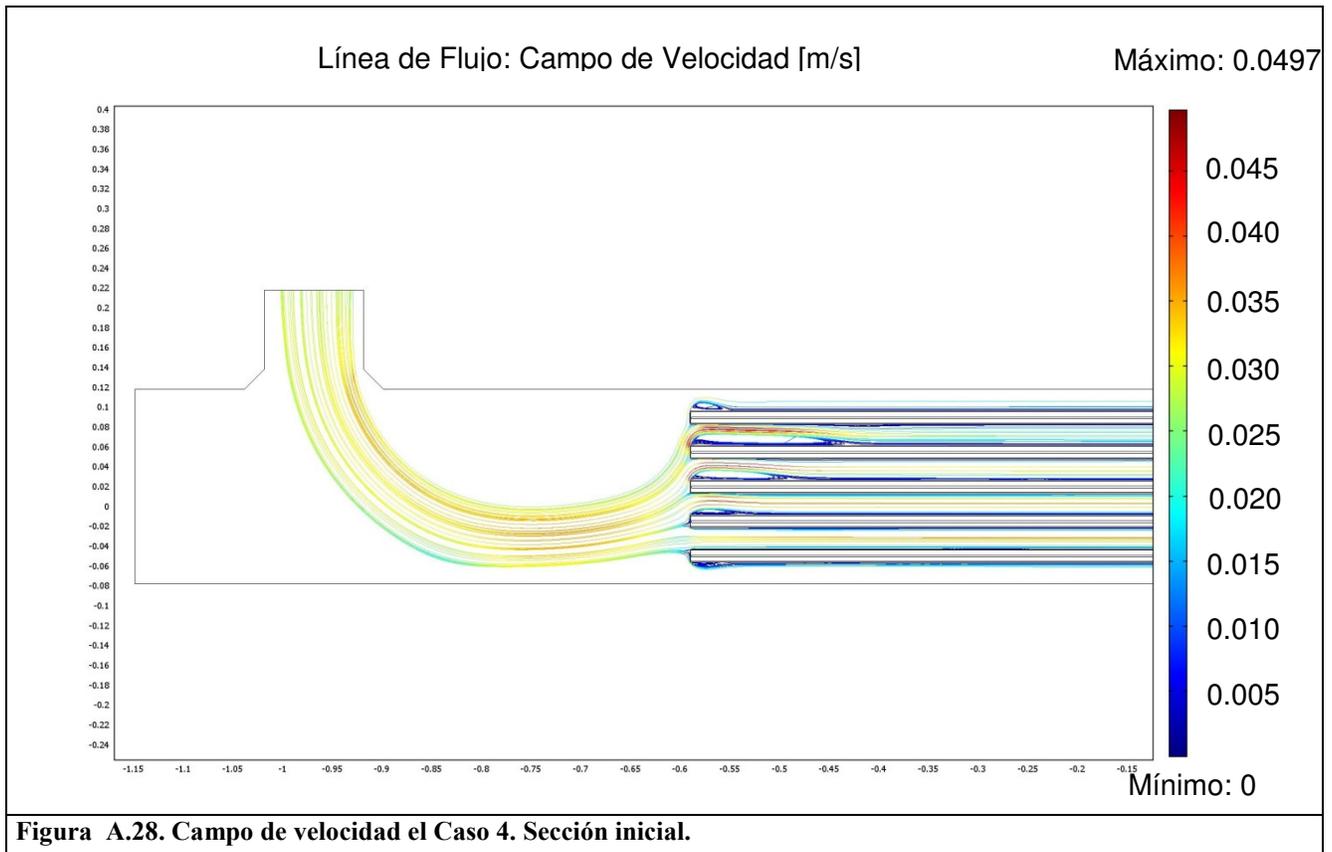


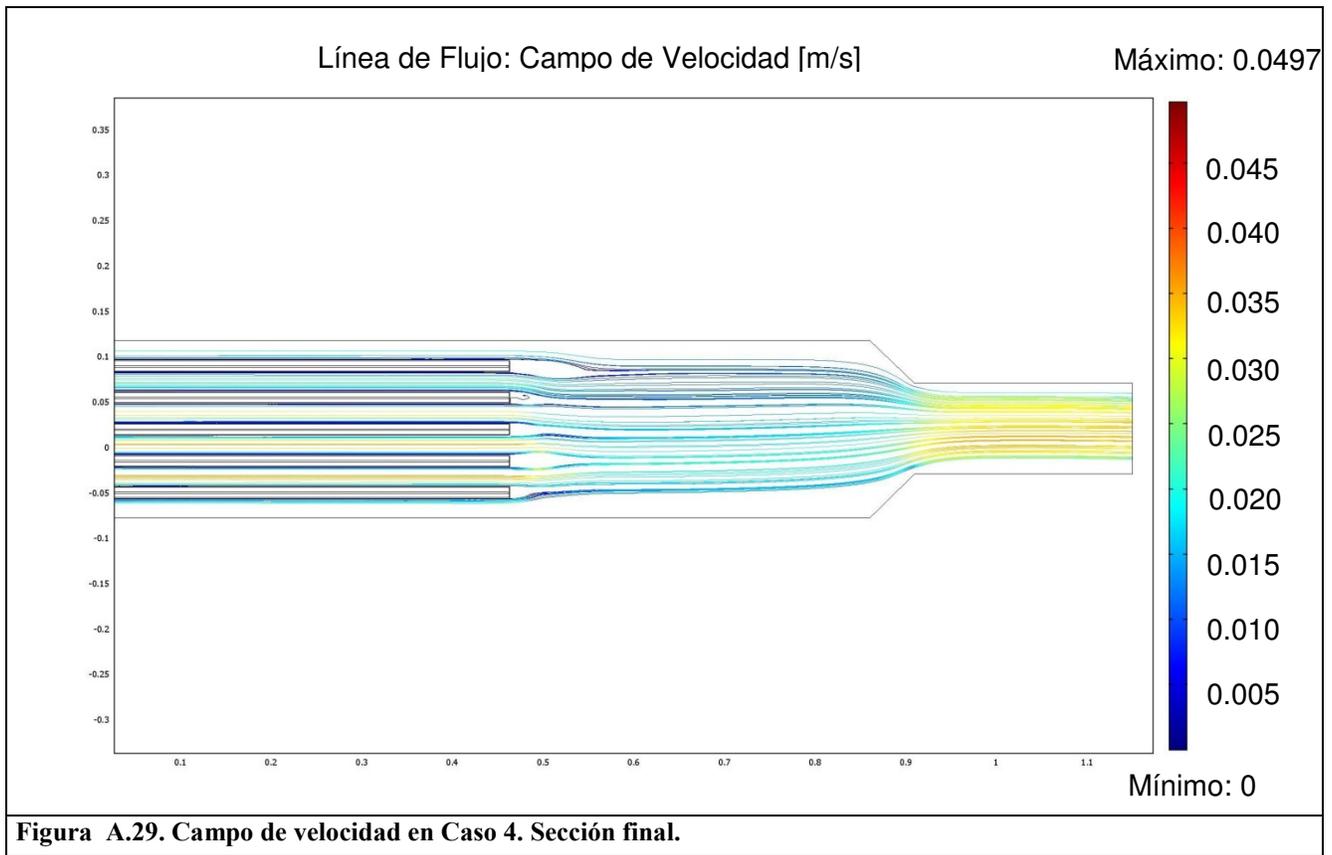
Figura A.27. Dimensiones del calentador resistivo de pasada simulado.

Los elementos tubulares tienen un largo de 1,1[m] y tienen la misma configuración que la usada en los casos anteriores.

El flujo de agua es de 83[l/min], con una velocidad de entrada de 0,1841[m/s] desde la parte superior del calentador.

i. Distribución de velocidad dentro de la tubería.

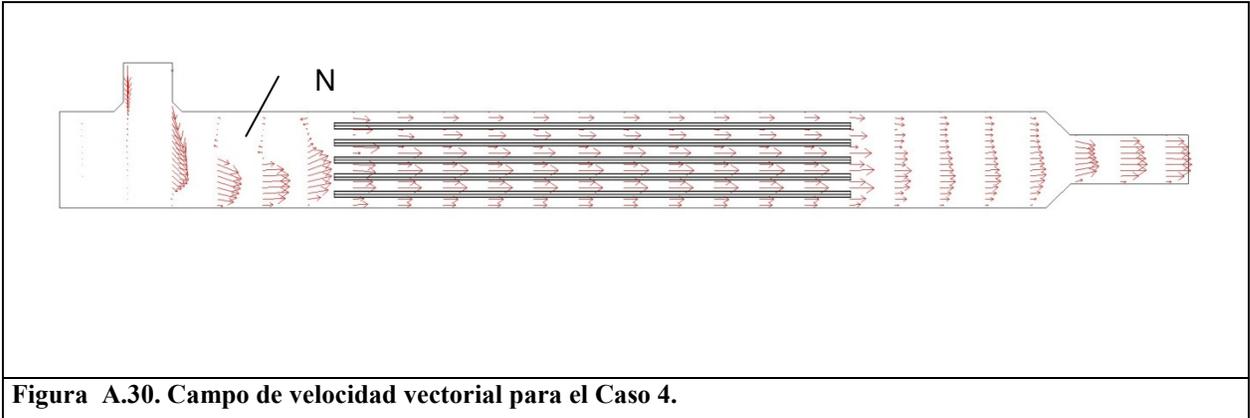




Se puede apreciar que el campo de velocidad en la entrada (Figura A.28) posee un flujo laminar, que genera en ciertas zonas un flujo con velocidad muy baja o casi nula. También se aprecia que el agua fluye de manera más rápida en la zona inferior del calentador, lo que provoca que los elementos superiores se calienten más. La Figura A.29 muestra la diferencia en la distribución de la velocidad dentro del calentador. El flujo mantiene su característica laminar cuando deja de tener contacto con los elementos tubulares, causando que en la parte inferior se mantenga una velocidad mayor a la mitad superior.

El campo de velocidad como vector se aprecia en la Figura A.30.

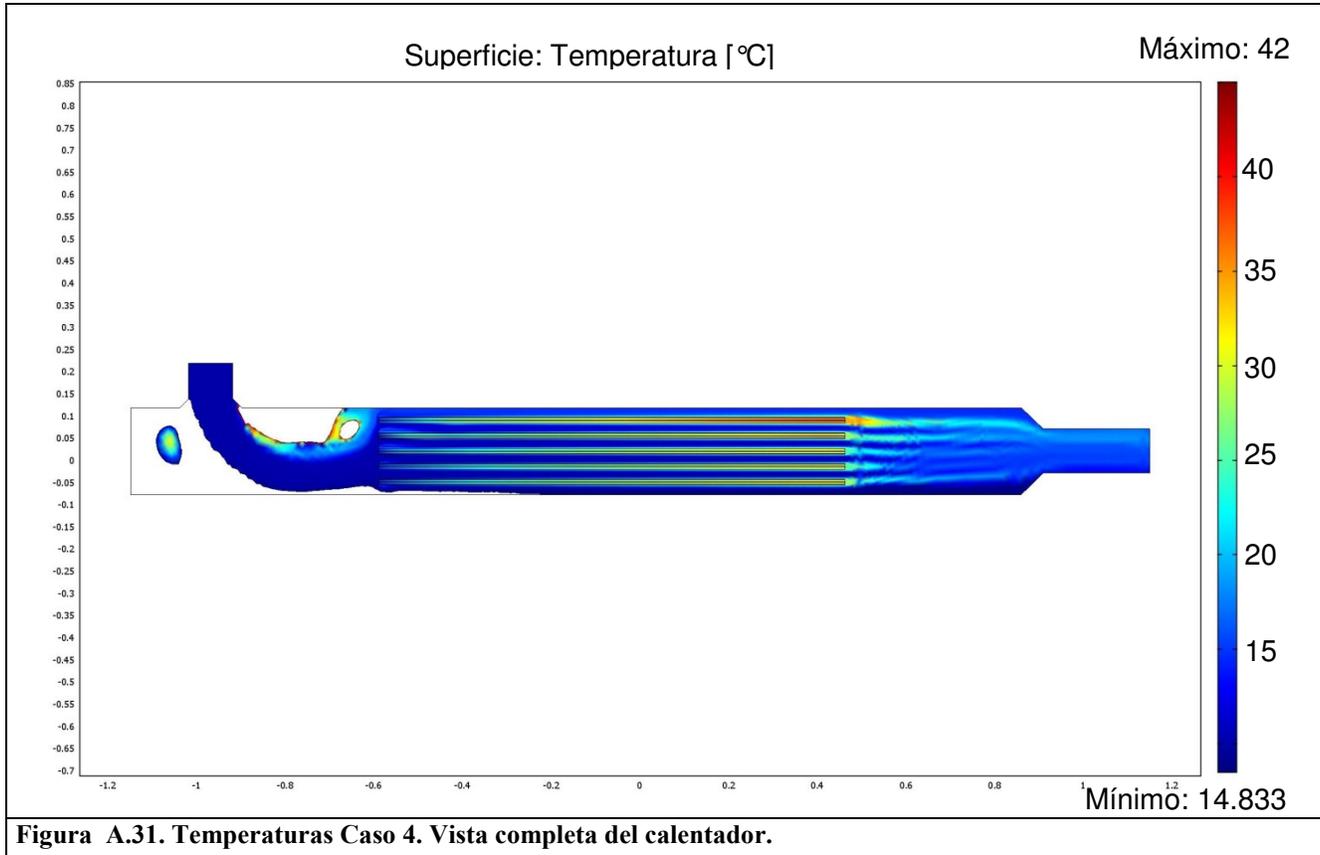
Vector: Campo de Velocidad [m/s]



**Figura A.30. Campo de velocidad vectorial para el Caso 4.**

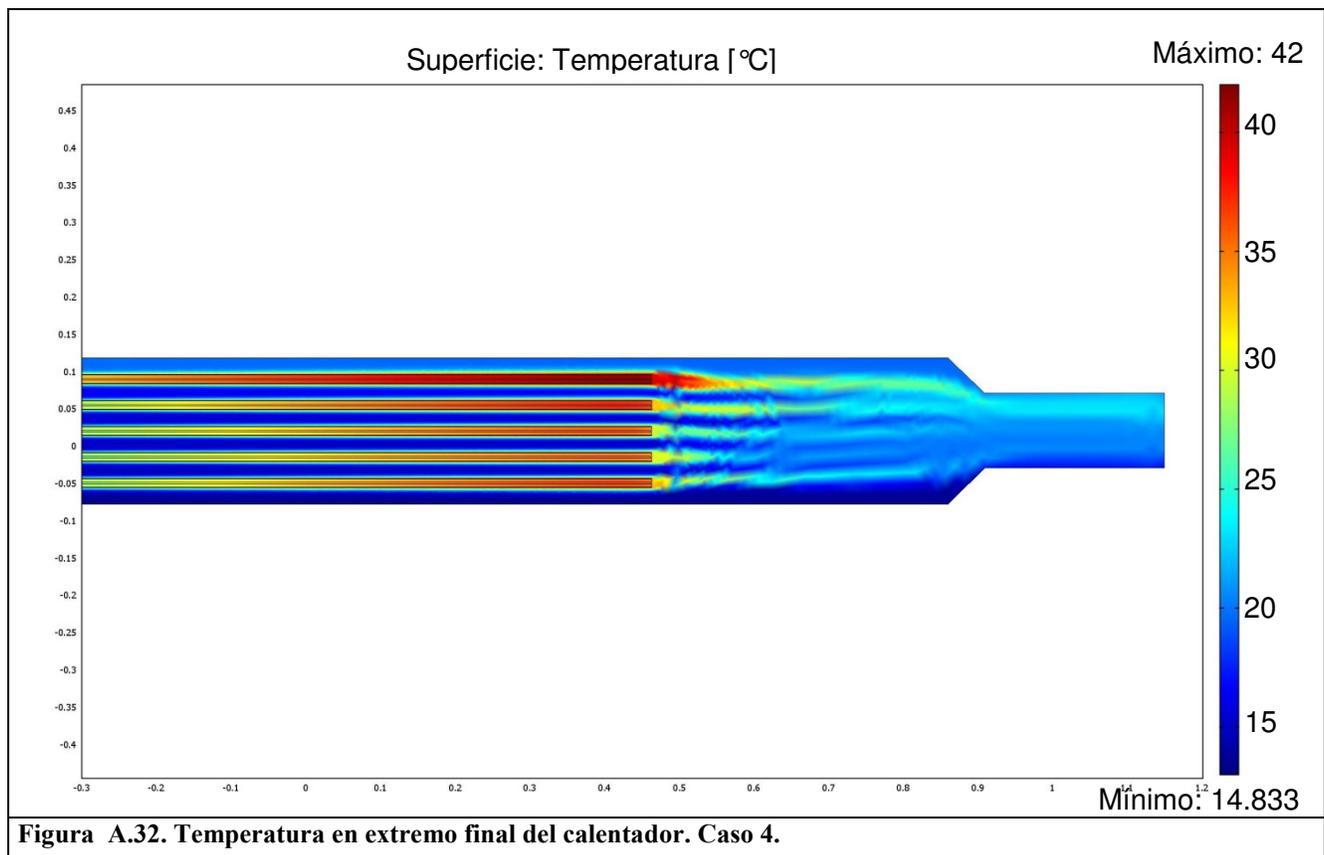
En la Figura A.30 se puede apreciar claramente el campo de velocidades no uniforme que se establece con la configuración simulada. En los calentadores reales de pasada los elementos tubulares están fijos a un flange ubicado en el fondo del calentador (lado izquierdo de la Figura A.28), lo que provoca que el agua que entra al calentador se encuentre inmediatamente con los elementos tubulares, provocando así una turbulencia mayor y una uniformidad de la velocidad a la salida del calentador. Esto no se puede simular en una situación 2D en Comsol, ya que al dibujar el elemento tubular fijo al fondo, se estaría obstruyendo el paso del agua y no se lograría ver el efecto. El punto N señalado en la Figura A.30 muestra un movimiento casi nulo del agua, con lo que se espera que en esa zona en particular exista un aumento de la temperatura debido a que no recircula el fluido, “estancándose” el calor. Esto se verifica en la Figura A.31 a continuación.

## ii. Distribución de temperaturas.

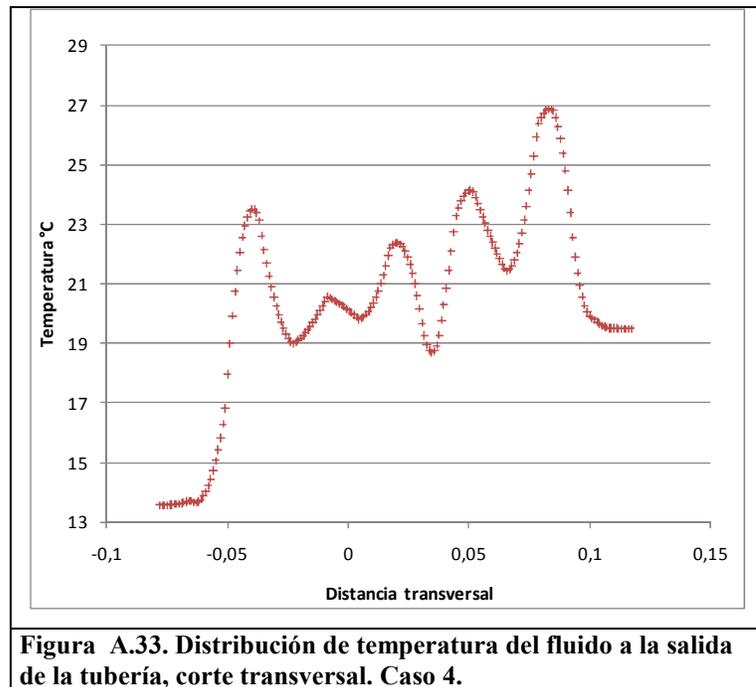


**Figura A.31. Temperaturas Caso 4. Vista completa del calentador.**

La Figura A.31 muestra que debido a la diferencia de velocidades que muestra el campo vectorial de la Figura A.30, la temperatura de las resistencias es diferente, siendo mayor la resistencia que es bañada por el fluido más lento (resistencia superior). Como se mencionó anteriormente, existe una zona en donde el fluido tiene una velocidad muy baja (punto “N” de Figura A.30), provocando una acumulación de calor, lo que se traduce en una elevación de la temperatura más allá de los 100°C (zonas blancas dentro de la tubería, lo que indica temperatura fuera de rango). Esto claramente es debido a problemas en el planteamiento de la malla o de la geometría del caso, ya que en cualquier caso, existe un movimiento y consiguiente transferencia de calor en esa zona de la tubería.



La distribución de la temperatura sigue siendo muy desigual en comparación al Caso 3, sin embargo, al existir un cambio en la sección de la tubería se logran formar pequeñas turbulencias que permiten en algo homogenizar la temperatura a la salida del calentador, como se aprecia en la Figura A.38 en la zona de disminución de sección, sin dejar de notar que la temperatura igualmente es muy distinta, como se puede apreciar en la Figura A.39 que muestra la temperatura en corte transversal.



Los valores mayores de la sección transversal corresponden a la temperatura de la resistencia superior en la Figura A.32, por donde la cual se desplaza en agua con una velocidad menor.

## A.6. Conclusiones

Se analizó el comportamiento de los elementos tubulares de calentamiento que se usan en calentamiento resistivo. Estos elementos fabricados de manera estándar disipan como máximo 10[kW] de potencia.

De los puntos de temperatura máxima existentes, se concluye que la temperatura de éstos se eleva mucho más que la del fluido, pero aún se mantienen muy lejos de las temperaturas que pudiesen provocar daños en los elementos tubulares. Con un flujo muy pequeño de agua, las temperaturas máximas no superan los 290°C.

También se concluye que el fluido presenta en las simulaciones muy poca uniformidad de la temperatura para cualquier nivel de flujo. Sin embargo, cierta uniformidad de temperatura se logra cuando el fluido circula por las diferentes secciones que componen el sistema hidráulico (secciones de tuberías, codos, bombas hidráulicas). Esto se observa en la Figura A.32 en donde el fluido logra una mayor homogeneidad en la zona de la tubería donde la sección es menor.

De las características técnicas de los calentadores resistivos de pasada, se encuentra que el Caso 4 no logra reproducir bien el comportamiento de los calentadores resistivos de pasada, ya que no se logró modificar la geometría del calentador de tal modo que en dos dimensiones, se generasen las

mismas turbulencias que posee el agua al entrar al calentador resistivo de pasada, el cual se encuentra inmediatamente con los elementos tubulares, que no disipan calor en su sección inicial llamada Cold-End. Sin embargo, una característica técnica analizada es que la distribución de la temperatura en los elementos tubulares es de forma creciente a lo largo de su longitud, por lo que es esperable que en los extremos más calientes se produzcan las fallas típicas de estos elementos. También se espera que el nivel de deposición de minerales (ya sea sarro u otros) sea mayor en el extremo final debido al mismo efecto.

## Anexo B. Costos Operacionales Anuales de Sistemas de Calentamiento

En las siguientes tablas se resumen los costos operacionales de los diferentes sistemas de calentamiento estudiados en esta Tesis. Se consideran sistemas para 2 niveles de potencia, 500kW y 1000kW.

**Tabla B.1. Costo Operacional Anual de Sistema Resistencias Eléctricas 500kW**

			<b>Comentarios</b>
Consumo energía eléctrica	4900 MWh		Anual. Eficiencia del 89,38%
Precio de Energía Eléctrica	0,1033 USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009 .Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo anual energía resistencias</b>	<b>506.179 USD</b>		Anual
Bomba Agua (7,4kW)	72,027 MWh		Anual. Se considera 90% eficiencia.
Precio de Energía Eléctrica	0,1033 USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009. Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo Anual Bombas</b>	<b>7.440 USD</b>		
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>490 USD</b>		Costo de Mantenimiento Propuesto de 0,1 US/MWh
<b>TOTAL ANUAL OPERACIÓN</b>	<b>514.351 USD</b>		

**Tabla B.2. Costo Operacional Anual de Sistema Inductivo 500kW**

			<b>Comentarios</b>
Consumo energía eléctrica	4.760,87 MWh		Anual. Eficiencia del 92%
Precio de Energía Eléctrica	0,1033 USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009 .Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo anual energía resistencias</b>	<b>490.370 USD</b>		Anual
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>1.238 USD</b>		Costo de Mantenimiento Propuesto de 0,26 US/MWh
<b>TOTAL ANUAL OPERACIÓN</b>	<b>491.607 USD</b>		

**Tabla B.3. Costo Operacional Anual de Sistema Calderas Diésel 500kW**

			Comentarios
Consumo de 1,264 veces lo nominal	55,76	kg/hr	Una eficiencia del 78,39% representa un 26,4% de aumento de consumo. Densidad de 0,85 kg/L 455 \$/Litro, Cambio: 560 \$/USD
	65,6	L/hr	
Precio Diésel	0,8125	USD/L	
<b>Costo Anual Petr6leo</b>	<b>466.915</b>	<b>USD</b>	Anual
Calefacci6n Diésel (el6ctrico)	1,394	kW	Se aumenta la T° en $\Delta T=50^{\circ}C$ Se considera 95% eficiencia.
<b>Costo Anual Calefacci6n Diésel</b>	<b>1.328</b>	<b>USD</b>	
Bomba petr6leo (el6ctrica; 2,2 kW)	21,413	MWh	Anual. Se considera 90% eficiencia.
Bomba agua (el6ctrica; 7,4 kW)	72,027	MWh	Anual. Se considera 90% eficiencia.
Precio de Energía El6ctrica	0,1033	USD/kWh	Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009. Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo Anual Bombas</b>	<b>9.658</b>	<b>USD</b>	
<b>Traslado de Diésel</b>	<b>30.000</b>	<b>USD</b>	Traslado de 60.000 L/mes por empresa transportista.
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>5.126</b>	<b>USD</b>	Costo de Mantenci6n Propuesto de 0,889 US/MWh
<b>Costo Anual Operador Caldera</b>	<b>41.786</b>	<b>USD</b>	Anual. Salario operador \$650.000 pesos mensual x 1 turno de 8 horas. Se requieren 3 turnos. Cambio: 560 \$/USD.
<b>TOTAL ANUAL OPERACI6N</b>	<b>554.807</b>	<b>USD</b>	

**Tabla B.4. Costo Operacional Anual de Sistema Resistencias Eléctricas 1000kW**

				Comentarios
Consumo energía eléctrica	9801	MWh		Anual. Eficiencia del 89,38%
Precio de Energía Eléctrica	0,1033	USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009 .Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo anual energía resistencias</b>	<b>1.012.358</b>	<b>USD</b>		Anual
Bomba Agua	7,4kW	72,027	MWh	Anual. Se considera 90% eficiencia.
Precio de Energía Eléctrica	0,1033	USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009. Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo Anual Bombas</b>	<b>7.440</b>	<b>USD</b>		
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>980</b>	<b>USD</b>		Costo de Mantención Propuesto de 0,1 US/MWh
<b>Costo Anual Mantenimiento</b>	<b>0</b>	<b>USD</b>		
<b>TOTAL ANUAL OPERACIÓN</b>	<b>1.021.256</b>	<b>USD</b>		

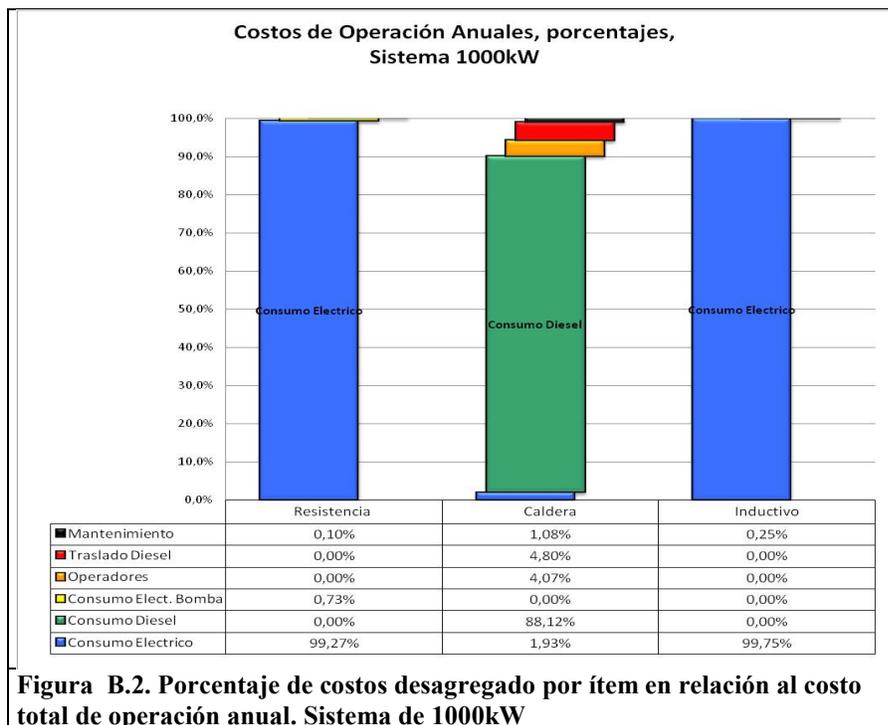
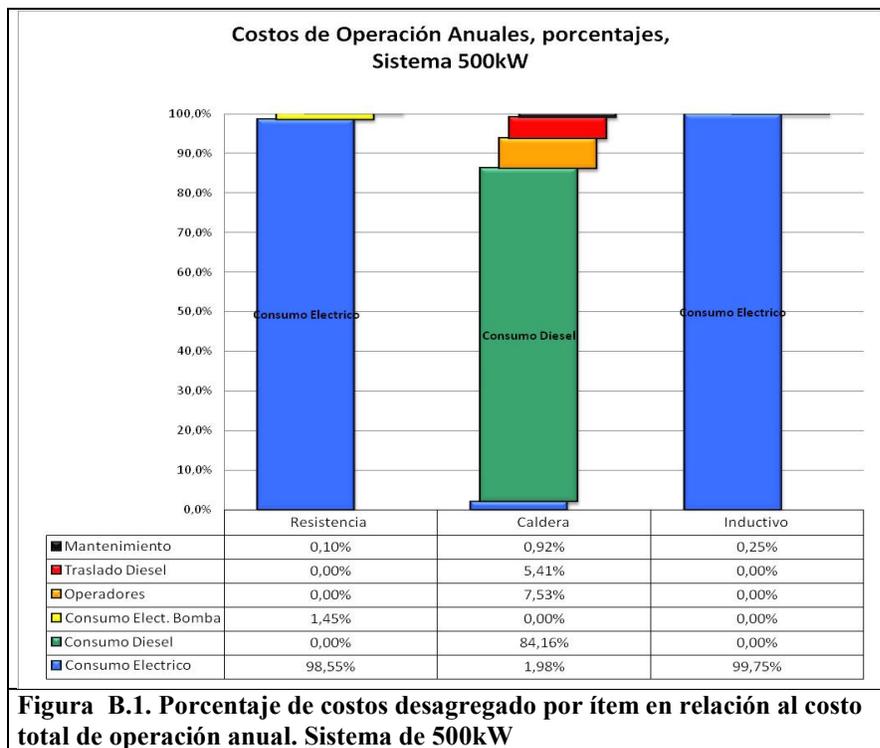
**Tabla B.5. Costo Operacional Anual de Sistema Inductivo 1000kW**

				Comentarios
Consumo energía eléctrica	9521,74	MWh		Anual. Eficiencia del 92%
Precio de Energía Eléctrica	0,1033	USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009 .Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo anual energía resistencias</b>	<b>980.739</b>	<b>USD</b>		Anual
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>2.476</b>	<b>USD</b>		Costo de Mantención Propuesto de 0,26 US/MWh
<b>TOTAL ANUAL OPERACIÓN</b>	<b>983.215</b>	<b>USD</b>		

**Tabla B.1. Costo Operacional Anual de Sistema Calderas Diésel 1000kW**

			Comentarios
Consumo de 1,264 veces lo nominal	107,99 kg/hr		Una eficiencia del 78,39% representa un 26,4% de aumento de consumo. Densidad de 0,85 kg/L 455 \$/Litro, Cambio: 560 \$/USD
	127,1 L/hr		
Precio Diésel	0,8125 USD/L		
<b>Costo Anual Petróleo</b>	<b>904.278 USD</b>		Anual
Calefacción Diésel (eléctrico)	2,700 kW		Se aumenta la T° en $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ Se considera 95% eficiencia.
<b>Costo Anual Calefacción Diésel</b>	<b>2.571 USD</b>		
Bomba petróleo (eléctrica; 9,7 kW)	94,413 MWh		Anual. Se considera 90% eficiencia.
Bomba agua (eléctrica; 7,4 kW)	72,027 MWh		Anual. Se considera 90% eficiencia.
Precio de Energía Eléctrica	0,1033 USD/kWh		Precio Medio de Mercado PMM CNE Junio 2009. Cambio: 560 \$/USD
<b>Costo Anual Bombas</b>	<b>17.192 USD</b>		
<b>Traslado de Diésel</b>	<b>49286 USD</b>		Traslado de 100000 L/mes por empresa transportista.
<b>Mantenimiento Anual</b>	<b>9928 USD</b>		Costo de Mantención Propuesto de 0,889 US/MWh
<b>Costo Anual Operador Caldera</b>	<b>41.786 USD</b>		Anual. Salario operador \$650000 pesos mensual x 1 turno de 8 horas. Se requieren 3 turnos. Cambio: 560 \$/USD.
<b>TOTAL ANUAL OPERACIÓN</b>	<b>1.025.035 USD</b>		

Las Figuras B.1 y B.2 muestran una comparación para cada nivel de potencia estudiado en esta Tesis de los costos desagregados anuales para cada tecnología de calentamiento. Se puede observar que independiente del sistema de calentamiento y de su nivel de potencia, la mayor parte de los costos anuales es debido al concepto de consumo de energía, ya sea diésel o electricidad, representando entre un 85-98%.





## Anexo C. Pérdidas en las Tuberías

El presente estudio tiene como objetivo establecer en nivel de pérdidas de calor en una tubería por donde pasa un flujo, y como éstas dependen de factores como el largo de la tubería, la sección y el material de la misma. El nivel de pérdidas se utilizará para calcular las eficiencias en los sistemas de calentamiento estudiados en esta Tesis.

Las pérdidas de calor que se producen en una tubería por donde fluye agua u otro fluido se pueden calcular teóricamente a través de las ecuaciones clásicas de transferencia térmica.

$$Q = \frac{T_2 - T_1}{R_{TOT}} [W] \quad (C1)$$

donde Q es el calor transferido desde el fluido hacia el ambiente,  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas externa e internas de la tubería respectivamente, y  $R_{tot}$  es la resistencia equivalente total del circuito térmico. En una tubería, el calor se transferirá desde el fluido caliente que circula, hacia el material de la tubería a través de convección. Luego, en la tubería se transfiere por conducción, y nuevamente por convección hacia el aire. Así  $R_{tot}$  puede escribirse como:

$$\begin{aligned} R_{TOT} &= R_{conv1} + R_{cond} + R_{conv2} \\ &= \left( \frac{1}{2\pi L r_1} \right) \frac{1}{h_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} + \left( \frac{1}{2\pi L r_2} \right) \frac{1}{h_o} \\ &= \frac{1}{2\pi L r_2} \left( \frac{r_2}{r_1} \frac{1}{h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o} \right) \quad (C2) \end{aligned}$$

donde:

$r_1$ : radio interno de tubería [m].

$r_2$ : radio externo de tubería [m].

L: largo de tubería [m].

$h_i$ : coeficiente de convección fluido-tubería [W/m<sup>2</sup> °C].

$h_o$ : coeficiente de convección tubería-aire [W/m<sup>2</sup> °C].

k: conductividad térmica tubería [W/m °C].

El valor de  $h_i$  puede variar en el rango de 50-10000 y  $h_o$  entre 25-50. Estas grandes variaciones son debidas a que el coeficiente depende de múltiples parámetros y características del fluido, como la velocidad del fluido, su viscosidad, densidad, calor específico, forma de la superficie, entre otras.

Dado lo complejo de determinar el mencionado coeficiente, usualmente se utiliza un coeficiente global de transferencia de calor para determinar de forma estimada la pérdida de calor en una tubería,

el que multiplicado por el área superficial de la tubería por donde hay transferencia de calor hacia el ambiente entrega el calor perdido desde el fluido.

Luego, la ecuación (C1) se puede reescribir como:

$$Q = U_o \cdot A \cdot (T_2 - T_1) [W] \quad (C3)$$

$$\text{con } U_o = \left( \frac{r_2}{r_1} \frac{1}{h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2 / r_1)}{k} + \frac{1}{h_o} \right) [W / m^2 \cdot ^\circ C] \quad (C4)$$

$$A = 2\pi L r_2 [m^2] \quad (C5)$$

donde  $U_o$  es el coeficiente global de transferencia de calor, y  $A$  es el área de transferencia de calor, o también el área superficial de la tubería.

Para calcular las pérdidas en la tubería, se supone que el fluido tiene una temperatura dada  $T_2$  y que el aire tiene una temperatura  $T_1$ . Para este estudio, se calculará un coeficiente  $U_o$  dado un material específico.

Las conductividades térmicas de algunos materiales utilizados comúnmente en la fabricación de tuberías se muestran en la Tabla C.1.

**Tabla C. 1. Conductividad Térmica de materiales usados en tuberías.**

Conductividad Térmica k [W/m °C]	
Acero	80
PVC	0,19
HDPE	0,49
Espuma de Poliuretano	0,021

A continuación se muestran los cálculos de las pérdidas para tuberías de distinto material:

### **Caso 1:**

Tubería de Acero. Flujo de 30[m<sup>3</sup>/h] de agua. Se aplican 500[kW] de calor para elevar la temperatura desde 10°C a 24,4°C. Las pérdidas que se producen se indican en la Tabla C.2.

**Tabla C. 2. Pérdidas en tubería de acero.**

Parámetros de la tubería de acero				
$r_1$	0,0745	[m]		
$r_2$	0,0750	[m]		
L	10	[m]		
$h_i$	5000			
$h_o$	30			
k	80	[W/m°C]		
$U_o$	29,814	[W/m <sup>2</sup> °C]		
$T_f$	24,4	°C		
$T_a$	10	°C		
<b>Pérdidas</b>				
Q <sub>loss</sub> =	2,020	[kW]	0,40	%
Q <sub>loss min</sub> =	1,126	[kW]	0,23	%
Q <sub>loss max</sub> =	3,369	[kW]	0,67	%

Los valores de  $h_i$  y  $h_o$  son aproximados y se utilizan para calcular Q<sub>loss</sub>. Para evaluar los valores mínimos (Q<sub>loss min</sub>) y máximos (Q<sub>loss max</sub>), se varían  $h_i$  y  $h_o$  dentro de los rangos señalados anteriormente. El porcentaje señalado en la Tabla C.2 el correspondiente a las pérdidas en relación a los 500[kW] inyectados teóricamente al fluido. Sin embargo, el porcentaje mostrado representa a las pérdidas en esta situación, independientemente de la cantidad de calor que inyecte al fluido, debido a que la ecuación (C3) no considera la variación de ningún parámetro con la temperatura. Sin embargo, este resultado es cercano a la realidad, ya que la variación de la conductividad térmica es baja para los materiales usados en este cálculo, por lo que se concluye que dicho nivel de pérdidas porcentuales se acerca mucho a las pérdidas reales en esta situación.

### **Caso 2:**

El presente caso desea estudiar las variaciones porcentuales de las pérdidas de calor en el caso de tener las mismas condiciones del Caso 1, pero con la tubería de acero forrada en espuma aislante de poliuretano. El flujo es de 30[m<sup>3</sup>/h] de agua. Se aplican 500[kW] de calor para elevar la temperatura desde 10°C a 24,4°C. La tubería se divide en los parámetros con subíndice “12” que representan a la interfaz acero-poliuretano, y “23” que representan la interfaz poliuretano-aire.

**Tabla C. 3. Pérdidas en tubería de acero forrada.**

Parámetros de la tubería de acero				
$r_1$	0,0700	[m]		
$r_2$	0,0745	[m]		
$r_3$	0,0750	[m]		
L	10	[m]		
$h_i$	5000			
$h_o$	30			
$k_{12}$	0,021	[W/m°C]		
$k_{23}$	80	[W/m°C]		
$U_o$	29,814	[W/m <sup>2</sup> °C]		
$T_f$	24,4	°C		
$T_a$	10	°C		
<b>Pérdidas</b>				
Q <sub>loss</sub> =	1,178	[kW]	0,24	%
Q <sub>loss min</sub> =	0,793	[kW]	0,16	%
Q <sub>loss max</sub> =	1,538	[kW]	0,31	%

Con una tubería aislada en espuma de poliuretano, las pérdidas de calor disminuyen a la mitad en relación a la tubería sin aislación, como se puede comparar con la Tabla C.2.

### **Caso 3:**

El caso 3 muestra las diferencias cuando se tiene un material distinto al acero, como es una tubería de HDPE. El flujo es de 30[m<sup>2</sup>/h] de agua. Se aplican 500[kW] de calor para elevar la temperatura desde 10°C a 24,4°C. Los resultados se observan en la Tabla C.4

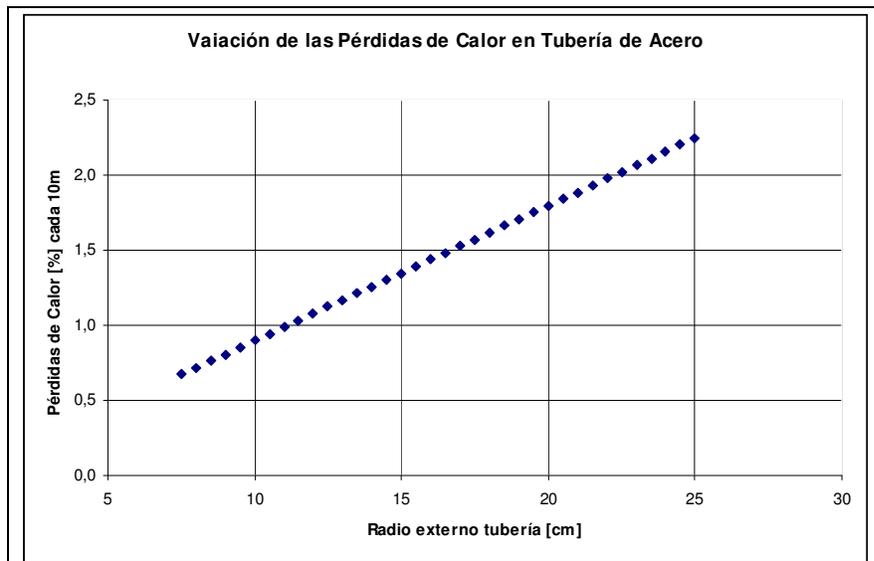
**Tabla C. 4. Pérdidas tubería HDPE**  
**Parámetros de la tubería de acero**

Parámetros de la tubería de acero				
r <sub>1</sub>	0,0700	[m]		
r <sub>2</sub>	0,0745	[m]		
L	10	[m]		
h <sub>i</sub>	5000			
h <sub>0</sub>	30			
k	0,49	[W/m°C]		
U <sub>o</sub>	29,814	[W/m <sup>2</sup> °C]		
T <sub>f</sub>	24,4	°C		
T <sub>a</sub>	10	°C		
<b>Pérdidas</b>				
Q <sub>loss</sub> =	1,960	[kW]	0,39	%
Q <sub>loss min</sub> =	1,108	[kW]	0,22	%
Q <sub>loss max</sub> =	3,207	[kW]	0,64	%

A pesar de lo pequeño de la conductividad térmica de la tubería de HDPE en relación a la tubería de acero, las pérdidas son similares para las mismas condiciones del caso 1.

Así, a través de los cálculos de las pérdidas en tuberías, se encontró que la variación porcentual de las pérdidas de calor dado una variación del espesor de la tubería en un rango entre 1-15[mm] es casi nula (menor a un 0,01%).

Por otra parte, la variación de las pérdidas de la tubería manteniendo un espesor de 5[mm], tiene una tendencia lineal como se muestra el gráfico de la Figura C.2.



**Figura C.1 Variación de las pérdidas de calor en tubería en función del radio.**

CONFIDENCIAL