

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

**“ESTUDIO DE INCRUSTACIONES CALCÁREAS EN COMPONENTES DE  
CENTRALES TÉRMICAS DE AGUA CALIENTE SANITARIA”**

**Memoria para optar al Título de:  
INGENIERO CIVIL MECANICO**

**ALUMNO : Luis Felipe Morales C.  
PROFESOR GUIA: Jorge Bornscheuer.**

**2018**

## **RESUMEN**

Este estudio trata el fenómeno de incrustaciones calcáreas en centrales térmicas de agua caliente sanitaria, específicamente en centrales térmicas de edificios.

Se seleccionan 3 centrales térmicas de comunidades de edificio ubicadas en las comunas de las Condes, Providencia y Santiago, pertenecientes a la región metropolitana. Se obtienen datos empíricos de temperaturas, presiones y velocidades del fluido (agua), al pasar por los distintos equipos y componentes de las centrales.

Estos equipos y componentes son:

Calderas, intercambiadores de calor (intercambiadores de placa), estanques acumuladores, bombas, cañerías y accesorios (válvulas y fittings).

Después de una evaluación de estos equipos y componentes que resultan afectados por incrustaciones calcáreas, se determina la naturaleza de estas incrustaciones mediante un análisis teórico de este fenómeno.

Después del estudio teórico de las causas de formación de incrustaciones calcáreas, se determinarán tres volúmenes de control para cada una de las tres salas de calderas. Después de describir y establecer la ubicación de dichos volúmenes se realizarán mediciones de temperaturas en un periodo determinado de tiempo y con estos datos se espera establecer algún patrón en el fenómeno de formación de incrustaciones calcáreas, específicamente en estas salas de calderas.

Se espera que este estudio sea un aporte a la industria de generación de agua caliente sanitaria, logrando establecer parámetros aplicables a metodología de control y prevención aplicable a centrales térmicas de agua caliente sanitaria que se encuentren dentro de un rango de potencias térmicas y consumo de agua caliente estándar, válido para comunidades de edificios.

## INDICE

<u>ITEM</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>	<u>PÁGINA</u>
CAPÍTULO I.....		- 5 -
INTRODUCCIÓN .....		- 5 -
1.1 ANTECEDENTES GENERALES .....		- 5 -
1.2 OBJETIVO GENERAL .....		- 6 -
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....		- 6 -
CAPÍTULO II.....		- 7 -
MARCO TEÓRICO .....		- 7 -
2.1 INCRUSTACIONES CALCÁREAS .....		- 7 -
2.2 ESTADO DEL ARTE .....		- 9 -
TRATAMIENTOS CONTRA INCRUSTACIONES .....		- 10 -
2.1 TRATAMIENTOS QUÍMICOS .....		- 10 -
2.1.1 Resinas .....		- 10 -
2.1.2 Lavado de tuberías .....		- 10 -
2.1.3 Reactivos autorizados .....		- 10 -
2.1.4 Ablandadores .....		- 11 -
2.1.5 Intercambiador iónico .....		- 11 -
2.1.6 Precipitación química.....		- 11 -

2.1.7 Protección catódica.....	- 12 -
<b>2.2 TRATAMIENTOS MECÁNICOS .....</b>	<b>- 12 -</b>
2.2.1 Tratamientos físicos.....	- 12 -
<b>2.3 TIPOS DE INCRUSTACIONES EN CENTRALES TÉRMICAS DE AGUA CALIENTE SANITARIA.....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>2.4 ANÁLISIS TERMODINÁMICO .....</b>	<b>- 25 -</b>
2.4.1 Formación de incrustaciones calcáreas .....	- 25 -
2.4.2 Resistencia térmica .....	- 35 -
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>DEFINICIÓN CENTRALES TÉRMICAS PARA EL ESTUDIO .....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>- 53 -</b>
<b>DESARROLLO MODELO DE VOLUMEN DE CONTROL EXPERIMENTAL PARA CADA SALA DE CALDERAS .....</b>	<b>- 53 -</b>
4.1 DEFINICIÓN METODOLOGÍA.....	- 64 -
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>- 68 -</b>
<b>EXPOSICIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>- 68 -</b>
5.1 EXPOSICIÓN DE RESULTADOS.....	- 68 -
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	- 80 -
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>- 86 -</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>- 86 -</b>

<b>NOMENCLATURA GENERAL</b> .....	- 90 -
<b>Bibliografía</b> .....	- 94 -
<b>ANEXO 1</b> .....	- 95 -
<b>ANEXO 2</b> .....	- 96 -
<b>ANEXO 3</b> .....	- 97 -
<b>ANEXO 4</b> .....	- 98 -
<b>ANEXO 5</b> .....	- 99 -
<b>ANEXO 6</b> .....	- 100 -
<b>ANEXO 7</b> .....	- 101 -
<b>ANEXO 8</b> .....	- 108 -

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES GENERALES**

A continuación, se indican el nombre, dirección y características constructivas de los tres edificios que servirán en este estudio. Con esta información se podrá tener las características individuales del agua sanitaria que alimenta a cada uno.

- Comunidad edificio Los Vikingos

Dirección: Los Vikingos 6340 comuna: Las condes.

Pisos: 13

Departamentos: 5 departamentos por piso.

- Comunidad edificio José Miguel Carrera 424

Dirección: José Miguel Carrera 424 comuna: Santiago.

Pisos: 9

Departamentos: 5 departamentos por piso.

- Comunidad edificio Cuarta Avenida

Dirección: Primera Transversal N°5875 comuna: San Miguel.

Pisos: 16

Departamentos: 6 departamentos por piso.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el comportamiento de formación de incrustaciones calcáreas en los componentes de las salas de calderas individualizadas, en función a la temperatura de funcionamiento del sistema en un período de tiempo determinado.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos que se indican a continuación son válidos para las tres salas de calderas que son parte de este estudio.

- 1.3.1 Determinar el volumen de control para el análisis de los componentes afectados por incrustaciones calcáreas.
- 1.3.2 Tomar datos de los parámetros y variables que interactúan en la generación de incrustaciones.
- 1.3.3 Obtención de valores que expresen el comportamiento real del fenómeno de generación de incrustaciones.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 INCRUSTACIONES CALCÁREAS**

Una incrustación se define como la existencia de determinadas partículas que se acumulan y adhieren a una superficie. Para nuestro caso dicha superficie corresponde a cañerías, fittings y componentes pertenecientes a sistema generador de agua caliente sanitario, generalmente conocido como sala de calderas.

Estas incrustaciones se clasifican según la forma en que se generan en dichas superficies:

##### **1.- Incrustación por precipitación**

Debido a que el agua cuenta con la presencia de distintas sales minerales como: sulfato de calcio, fosfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio, dióxido de silicio y carbonato de calcio [1], y que la capacidad de las sales de disolverse en el agua es afectada por la temperatura de esta, es que se produce la precipitación de las sales.

Las sales que se precipitan tienen iones divalentes lo que los hacen ser depósitos duros y de difícil remoción.

##### **2.- Incrustación particulada**

Cuando el fluido, en este caso agua, contiene partículas como barro, arena, estas decantan y se adhieren a las paredes de las cañerías.

##### **3.- Incrustación por reacción química**

Cuando ciertas partículas o iones presentes en el agua reaccionan entre si sobre la superficie de las cañerías se generan depósitos sobre ella.

#### 4.- Incrustación por corrosión

Las incrustaciones por corrosión suceden debido a la reacción química entre las sales presentes en el agua y el material de las cañerías que la transportan.

#### 5.- Bioincrustación

Estas se deben a la presencia de una película biológica formada por el crecimiento de especies biológicas, este depósito subsiste en las paredes de las cañerías, válvulas y demás componentes. Los depósitos biológicos han alcanzado un tamaño entre 50 y 500  $\mu\text{m}$  [2].

En la literatura técnica, se encuentra definido un orden en la fase de generación de las incrustaciones, dicho orden es el siguiente:

“Proceso de nucleación, transporte, fijación y si es el caso desprendimiento” [4].

Las características del fluido de trabajo, para el presente caso el agua, tales como propiedades físicas, químicas, pH, estado del régimen del fluido, si es laminar o turbulento, tipo de superficie por donde se transporta y a qué velocidad. Son factores que determinar la formación de las incrustaciones.

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

Antes de las últimas tecnologías en remoción de incrustaciones, los sistemas que se encontraban con este tipo de problemas se veían obligados a reemplazar los tramos de cañerías afectados, como también las válvulas y componentes involucrados. Es necesario indicar que actualmente muchas instalaciones todavía no cuentan con sistemas de control de incrustaciones y siguen con las prácticas de reemplazo de piezas.

La posibilidad de advertir esta situación desde sus inicios resulta de gran valor para los operadores. Existen instalaciones que cuentan con sistemas de monitoreo permanente que están preparados para detectar los cambios que se puedan producir en la composición química del agua. El desarrollo de sensores subterráneos de incrustaciones y las aplicaciones de monitoreo permanente son temas de acentuada investigación actual. BP Amoco, por ejemplo, comenzó un sistema de manejo integrado de incrustaciones que utiliza un sensor electroquímico subterráneo sensible al pH y a las concentraciones de iones de cloruros, que además efectúa mediciones de temperatura, presión y flujo multifásico para detectar potenciales formaciones de carbonatos y ayudar a regular las dosis químicas para lograr el control de las incrustaciones.

Actualmente se dispone de modelos químicos que permiten pronosticar la naturaleza y la extensión de las incrustaciones a partir de las condiciones detalladas de los fluidos. Estos modelos pueden pronosticar el equilibrio de las fases utilizando principios de termodinámica y bases de datos geoquímicos y parten de ciertos datos básicos, como el análisis de concentración de elementos, temperatura, presión y composición de la fase de gas. Estos programas están diseñados para predecir el efecto de las perturbaciones, como mezclas incompatibles o cambios en la temperatura y la presión.

Hoy en día existen al alcance de la industria muchos programas para pronosticar la formación de incrustaciones, junto con un número limitado de programas computacionales preparados para pronosticar problemas de incrustaciones que

pueden producirse durante el tiempo, considerando distintos escenarios de comportamiento de instalaciones hidráulicas. [3]

## **TRATAMIENTOS CONTRA INCRUSTACIONES**

En la literatura especializada los tratamientos contra incrustaciones dentro de procesos industriales son clasificados de la siguiente forma:

### **2.1 TRATAMIENTOS QUÍMICOS**

#### **2.1.1 Resinas**

Mediante la utilización de resina la que actúa por intercambio iónico con minerales tales como calcio, magnesio y otros minerales disueltos en el agua. Implica un mantenimiento periódico para la regeneración de la resina. Este proceso genera desechos, que no pueden ser vertidos directamente al sistema de alcantarillado.

#### **2.1.2 Lavado de tuberías**

Eliminación de las incrustaciones calcáreas mediante lavado de las tuberías con ácido; procedimiento altamente corrosivo, que implica la renovación de las tuberías a corto plazo. Altamente dañino para el medio ambiente.

#### **2.1.3 Reactivos autorizados**

Inyección de reactivos autorizados en el interior de las conducciones como silicatos (protege de los diversos tipos de corrosión), orto fosfatos de cinc (para aguas de débil dureza y agresivas), silico-polifosfatos (no se aconsejan para aguas muy duras, tienen el doble papel de inhibir el crecimiento de las incrustaciones y evitar la corrosión).

#### **2.1.4 Ablandadores**

Ablandadores o aparatos de permutación basados en zeolitas, de ciertos silico-aluminatos sódicos sintéticos que modifican la composición química del agua reduciendo su dureza TH a valores aceptables, suprimiendo, por consiguiente, el origen mismo de la incrustación.

#### **2.1.5 Intercambiador iónico**

Método para la prevención de formación de incrustaciones, que consiste en ablandar el agua haciéndola pasar por un intercambiador iónico que elimina del agua los iones indeseables que se transfieren a un material sólido o intercambiador iónico. Estos intercambiadores son matrices sólidas que contienen sitios activos con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ion de carga opuesta.

A medida que la disolución pasa por la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originalmente en los sitios activos. La eficiencia del proceso depende de factores como afinidad de la resina por un ión particular, el PH de la disolución (carácter ácido y básico dl grupo activo), la concentración de iones o la temperatura.

#### **2.1.6 Precipitación química**

Este método convierte las sales solubles en otras insolubles, de forma que puedan ser eliminadas mediante sedimentación o filtración posterior. Se utiliza normalmente cal o hidróxido de sodio para eliminar la dureza, sin embargo, el método exacto de adición depende del tipo de dureza presente. La cal es la más empleada, pero como los hidróxidos, producen un gran volumen de lodos que es necesario deshacerse de ellos.

### **2.1.7 Protección catódica**

- Por ánodos de sacrificio
- Por corriente inversa

Para los sistemas de calentamiento con depósitos pequeños deben seleccionarse algunos de los modelos estándar en los que el fabricante incorpora todos los elementos de protección que le permitan dar una garantía. Este sistema protege la instalación contra la corrosión, gracias a que un ánodo reactivo es oxidado en lugar del material del recipiente. Como punta en contra se puede mencionar que requiere de mantenimiento y controles importantes, alteraciones organolépticas (olor y gusto) del agua. Es conveniente para los depósitos, calentadores y las grandes instalaciones.

## **2.2 TRATAMIENTOS MECÁNICOS**

Método intensivo y laborioso de eliminación mecánica de las incrustaciones que implica necesariamente la paralización de las actividades productivas para desmontaje de tuberías y equipos. Resultados altamente costosos.

### **2.2.1 Tratamientos físicos**

Los tratamientos físicos mediante aparatos anti calcáreos tienen como objetivo evitar los depósitos, no modifican la dureza del agua ni de ningún parámetro físico-químico y están basados en los siguientes fenómenos:

- a) Magnético – campo magnético e incremento de la velocidad de las partículas
- b) Electrolítico – electrólisis
- c) Ultrasónico – por resonancia ultrasónica
- d) Combinación de campo complejo electromagnético y ultrasónico

Los tratamientos físicos (Physical water treatment, PWT) no reducen el valor de la dureza del agua, modificando a través de diversos procedimientos indicados en las letras a) a d), si no que reducen la capacidad del carbonato cálcico a depositarse en el interior de las cañerías y sus componentes, intentando conseguir que, en lugar de formarse un cristal de carbonato cálcico, se formen multitud de pequeños micro cristales que se repelen entre sí y se arrastren con el agua.

Según lo indicado por el autor Francisco J Pancorbo [4], los métodos de tratamiento químicos son predominantes en comparación a los tratamientos físicos cuyo número de estudios científicos publicados son menores. En el mismo texto de referencia se mencionan a los autores Minenko y Petrow como autores de los principales trabajos y estudios donde se plantea la posibilidad de modificar las propiedades químico-físicas del agua y de las soluciones acuosas por medio de campos electromagnéticos, otros autores como Skorobogatow, Martinowa y Gusew, Drasow y Kerson han estudiado la formación de gérmenes cristalinos en agua sobresaturada de carbonato calcino en presencia de campos electromagnéticos.

Datos importantes (fuente: [4])

Los aparatos para el tratamiento físico del agua han sido sometidos por diversos organismos y centros independientes a pruebas prácticas con resultados contradictorios.

Algunos organismos y centros independientes

- 1.- Dirección de investigación de Gaz de France (CERUG)
- 2.- El departamento de energía del Instituto Politécnico de Turín
- 3.- German gas and Water Co-operation (DVGW)

Este organismo presenta un reglamento técnico W512 (Procedimiento para valorar la eficacia de los dispositivos de tratamiento físico del agua para reducir las incrustaciones)

4.- Institute national des sciences et techniques nucléaires (Centre CEA de Saclay-France)

5.- Department of health de UTA

6.- US Naval Engineering experimental station

Este último organismo realiza una publicación con fecha 15 de junio de 2001, llamada "Public Works Technical Bulletin 420-49-34" donde concluye que no existe ventaja clara para ninguno de los aparatos electromagnéticos probados para la inhibición de la corrosión.

7.- International Association of Plumbing and Mechanical Officials (IAPMO)

La IAPMO desarrolla la guy IGC 91-2006 "Project on electrical anti-scale water conditioning appliance or high-density magnetics"

8.- ASME y ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Research)

Realizan la publicación del document 1155-TRP: "Efficiency of non-chemical water treatments in controlling calcium scale accumulation in recirculating open cooling water system".

### Tipos de descalcificadores PWT

Aparatos PWT sin alimentación eléctrica

Estos aparatos resultan particularmente atrayentes para los usuarios, gracias a la ausencia de conexiones eléctricas, presentan un costo de funcionamiento y de

mantenimiento nulo y una fiabilidad mecánica extremadamente elevada gracias a la ausencia de partes móviles o de circuitos electrónicos, frente a unos resultados que no siempre cumplen las expectativas. Se basan en uno o más imanes permanentes, convenientemente conformados que se fijan en la superficie de la tubería o se instalan en su interior, a la entrada de la red de suministro, de manera que el agua que pasa por la unidad queda sometida a un campo magnético. Una fuerza (fuerza de Lorentz) es ejercida sobre cada ión, fuerza que es perpendicular tanto al campo magnético como a la dirección del movimiento y es proporcional a la velocidad del agua.

Este método tiene las siguientes observaciones, y es que no elimina la cal en el agua, por lo que no produce ablandamiento y los resultados no se garantizan ya que el éxito depende de las características del agua y de la instalación.

#### Imanes Permanentes

Se instalan a partir de 1950 en Estados Unidos, para pequeños caudales de agua. A partir de 1985 comienza su desarrollo más importante, gracias a la aparición de potentes imanes de Neodimio y de Samario.

Al atravesar el agua el dispositivo, la acción del campo magnético modifica la agregación de los cristales de carbonato cálcico, sustancia polimorfa que cristaliza preferentemente bajo la forma de calcita, en el sistema hexagonal en forma romboédrica que favorece la estratificación y la formación de incrustaciones particularmente adherentes y duras, pasando a formar aragonito, que cristaliza en el sistema rómbico, presentándose en masas fibrosas que dificultan su agregación entre ellas y sobre paredes de las tuberías. La suspensión o los sedimentos de estos cristales son fácilmente arrastrados, en el caso de las instalaciones abiertas, por el flujo de agua hacia el grifo o bien, en el caso de instalaciones de circuito cerrado, retenidos por filtros.

En la investigación del estado del arte se encuentran distintas publicaciones de investigadores que tratan el fenómeno, no solo de forma teórica, también de forma experimental.

Dentro de esta investigación existe un estudio publicado en la “XI Conferencia Internacional de Tecnología del Agua”, realizada por los docentes: Mostafa M. Awad, I. F. Abd El-Wahab y H. E. Gad, profesores del Departamento de Ingeniería de Energía Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Mansoura, Egipto.

Dentro de dicho estudio se analizan el efecto de la temperatura de las paredes de las cañerías que transportan el agua y la velocidad del fluido en la formación de incrustaciones calcáreas. [1]

Para el desarrollo experimental del capítulo IV, de este estudio, se estudiarán y monitorearán los parámetros de temperaturas y velocidad tal como lo desarrolló la investigación de los docentes de la universidad de Mansoura.

### **2.3 TIPOS DE INCRUSTACIONES EN CENTRALES TÉRMICAS DE AGUA CALIENTE SANITARIA**

Se excluyen los circuitos semiabiertos de refrigeración y circuitos abiertos de agua para calderas.

Los reglamentos de instalaciones de calefacción surgen de la necesidad de establecer un criterio de ahorro energético. Basándose en este criterio, las características constructivas de las actuales calderas de calefacción están orientadas hacia un rendimiento y un aprovechamiento mayor de los materiales, reduciendo el contenido de agua y aumentando el uso de fluidos térmicos.

Los efectos de las incrustaciones tanto en la resistencia de los materiales como en la duración de las instalaciones es un factor a tener en cuenta.

La evolución tecnológica y empeoramiento de la calidad del agua hace que sea necesario efectuar un tratamiento al agua de los circuitos de calefacción, para evitar las incrustaciones y los problemas de corrosión.

Es indudable que un tratamiento reduce los costos de explotación y de mantenimiento, y se aumenta el rendimiento de la instalación.

Para este trabajo, las centrales térmicas seleccionadas para realizar el estudio en el capítulo III, no cuentan con tratamiento de agua, condición que se repite para la mayoría de las instalaciones de centrales térmicas en edificio en la región metropolitana.

En los casos en que no se realiza un tratamiento del agua para las centrales, aparecerán problemas de corrosión, incrustación calcárea. Para el caso de las incrustaciones calcáreas, estas dan lugar a roturas de las calderas de fundición y a deformaciones de la chapa en las calderas de acero, debido a que se impide el intercambio térmico entre el hogar y el agua, dando lugar a sobrecalentamiento localizados que motivan la deformación. Cuando las calderas son de fundición, el salto térmico separado por la incrustación hace que, al contacto del agua con la fundición sobrecalentada, se produzca un golpe térmico que no siempre es soportado por el material.

Los problemas de rotura en los circuitos de calefacción que se producen como consecuencia de la incrustación calcárea suelen afectar, además de a las calderas, a los componentes móviles tales como válvulas de mezcla, válvulas de alivio, etc.

Actualmente la construcción de las calderas permite obtener un elevado salto térmico, lo que junto con una mejora de los emisores y a una buena termorregulación, dará lugar a una instalación de óptima calidad energética y de bienestar. Se comprende fácilmente que una incrustación, aunque sea de pequeño espesor, o un principio de corrosión, puede afectar de manera muy significativa al funcionamiento.

Por otra parte, los distintos accesorios de seguridad que requiere una central térmica, son afectados por las incrustaciones lo que hace que se estén reemplazando constantemente.

Un circuito de calefacción que trabaje con agua dura (sin tratar) dará lugar a la formación de depósitos calcáreos que serán más acusados en los puntos donde el salto térmico sea mayor. La incrustación es función tanto de la dureza del agua como de la velocidad de circulación y del salto térmico.

La descomposición de los bicarbonatos cálcicos y magnésicos en sales insolubles es función de la temperatura y que se produce de forma completa a los 100 [°C].

La unidad de medida de la dureza del agua que se utiliza más habitualmente son los grados hidrométricos o grados franceses [°H o °F], conceptualmente representa que cada grado de dureza equivale a una solución que contiene 10 [mg] de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  por litro. Por ejemplo, un agua de 35 [°H o °F] de dureza contiene 350 [mg/l]. Si se produce un fenómeno de incrustación uniforme, el problema sería grave, pero dado que las sales se depositan en zonas muy determinadas y en superficies reducidas de las calderas, esto es, sobre superficies de mayor intercambio térmico, el problema sufre un agravamiento importante.



Fig. 2.1: Ejemplo de incrustaciones calcáreas en componentes sala de calderas.

Dentro de las especies químicas que conforman las incrustaciones se encuentran al calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe) asociados a aniones de tipo sulfatos ( $\text{SO}_4$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3$ ) y sílices amorfas. Las especies más adherentes y compactas son los silicatos de magnesio, los carbonatos y finalmente los sulfatos, es ese mismo orden.

Las sales que producen más incrustaciones son los carbonatos y sulfatos de calcio y de magnesio y más rara vez la sílice, también hay algunas incrustaciones menos frecuentes, como las orgánicas, las de cal y las de hierro, siendo infrecuente encontrar una incrustación formada por una sola de estas sustancias ya que, por lo general, son una mezcla de todas las sales predominando una de ellas.

Los carbonatos, muy poco solubles en el agua y tanto menos cuando más elevada es su temperatura, pueden serlo cuando, favoreciendo por el anhídrido carbónico, pasan al estado de bicarbonatos, y es en este estado en el que se encuentran en las aguas naturales, que, al perder por calentamiento este elemento, provocan el depósito. La incrustación formada por carbonatos es comúnmente de forma granular y algunas veces muy porosas. Los cristales de carbonato de calcio son grandes y frecuentemente están unidos por partículas minúsculas de otras materias, lo cual hace que la incrustación parezca más compacta y uniforme. Las incrustaciones originadas por carbonatos se reconocen fácilmente con solo sumergirlas en una solución de ácido ya que al poco tiempo de la inmersión se comienza a desprender burbujas de dióxido de carbono.

Las incrustaciones de cal no serían demasiado de temer, porque son poco adherentes, pero las presencias de otras sales pueden llegar a modificar este estado. Se debe señalar especialmente entre ellas la formada por sulfatos, que es mucho más dura y compacta que la de origen carbonatado, porque los cristales son más compactos siendo sin embargo más quebradiza y no se pulveriza tan fácilmente como la originada por carbonatos y a demás no produce efervescencia al ser sumergida en baño de ácido, pero en cambio se disuelve en ácido caliente.

El sulfato de calcio, que es la sal incrustante por excelencia, ya que da origen a depósitos duros y de gran adherencia, puede redisolverse en el agua fría con gran dificultad y lapso de tiempo considerable.

El sulfato de magnesio es bastante soluble, y no sería tampoco de temer si se encontrara solo, pero en caliente forma con el carbonato de calcio, el carbonato de magnesio y con el sulfato de calcio, incrustaciones y son estas combinaciones y otras análogas las que lo hacen clasificar entre las sales incrustantes.

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e hidróxido de magnesio  $\text{Mg(OH)}_2$  se forman por la descomposición principalmente térmica (en ausencia de dióxido de carbono) de la especie bicarbonato de calcio y bicarbonato de magnesio.

En este caso, al igual que el bicarbonato de magnesio, son constituyentes de las durezas temporales, pero cuando se trata de la dureza permanente (sulfatos y cloruros de magnesio) se produce la precipitación en los sistemas de generación de vapor y en las calderas de mediana y baja presión por un efecto, no ya por descomposición térmica sino de concentración causada por la producción de vapor, hasta que se alcanza la saturación. Las incrustaciones de sulfato de calcio se producen en las superficies más calientes ya que la solubilidad de este elemento decrece con la temperatura de forma muy rápida. A pesar de que la masa de agua no esté saturada, la zona líquida inmediata a la superficie caliente, a causa del gradiente de temperatura, se encuentra en estado de sobresaturación. Es por eso que se produce una formación de cristales muy adheridos a esta superficie, sin que se haya producido ninguna precipitación en la masa líquida restante. Las incrustaciones de sílice se deben a la presencia de sílice disuelta en el agua que, bajo ciertas condiciones, se torna insoluble, formando depósitos muy adherentes. (Ver anexo 1).

El problema radica en que cada vez que se produce la siguiente reacción química:



Se produce carbonato de calcio en forma de calcita, que es muy insoluble, y con el aumento de la temperatura empeora, como puede observarse en el gráfico de la figura 2.2, depositándose en forma de incrustaciones.

Todas las sales del carbonato cálcico (calcita, aragonito, vaterita) son más insolubles a medida que aumenta la temperatura del agua. Por esto se producen las incrustaciones en las tuberías, en los intercambiadores de calor y otros dispositivos. Este hecho se ve agravado con la concentración de sales debido a la evaporación.

Otra tipología de los depósitos incrustantes basada, en esta ocasión, en los mecanismos primarios de su formación es:

a) Incrustación de tipo cristalino

Su mecanismo de formación es de nucleación, por condiciones de supersaturación salina y presión:

Primero se forman núcleos iniciadores de depósitos en las rugosidades de la superficie y sus cristales preformados toman un ordenamiento concéntrico cristalino. Su formación es lenta y continua a través del tiempo. Sus fuerzas intermoleculares de adherencia (van der Wals) son muy elevadas y como resultado se forman depósitos que sólo pueden ser removidos mecánicamente. Su densidad es muy elevada y no tiene características de porosidad.

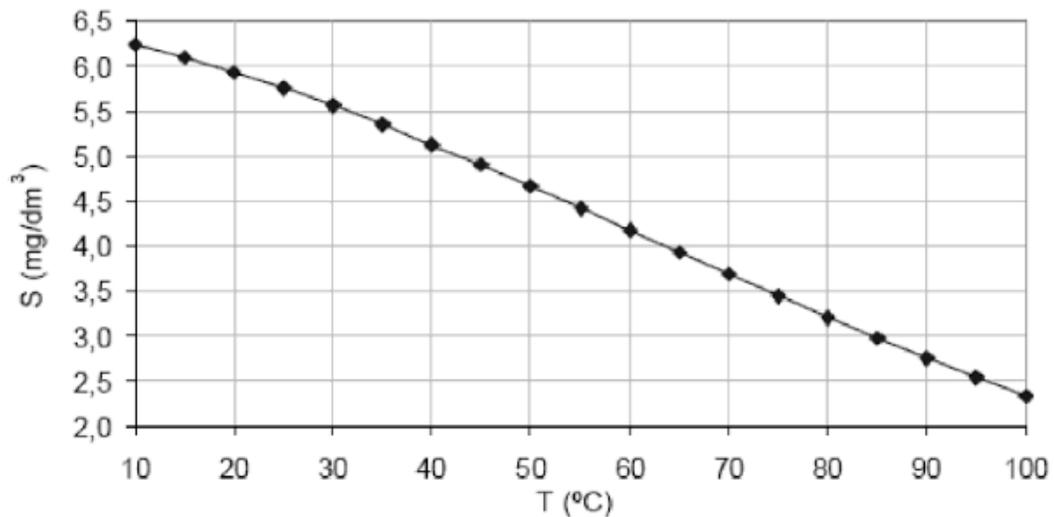


Fig. 2.2: Variación de la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  con la temperatura (calcita). [4]

#### b) Incrustaciones amorfas

Este tipo de incrustación es, a diferencia de la anterior, mucho menos adherente, es inconsistente al tacto y porosa, su nucleación es desordenada y heterogénea, puede ser eliminada de forma relativamente fácil por agentes químicos. Su mecanismo de formación es la pérdida parcial o total de la solubilidad del sólido, generalmente de los sólidos suspendidos combinados con la dureza permanente del agua.

También existe la posibilidad de que el depósito se forme a causa de agentes dispersantes.

#### c) Incrustaciones por depósitos de sedimentos

Los sedimentos provenientes de los sólidos suspendidos en el agua van lentamente provocan obturaciones en el sistema hidráulico; son verdaderas borras amorfas con muy poca adhesión y eliminables con productos dispersante.

Los iones de calcio [ $\text{Ca}^{++}$ ] e iones de magnesio [ $\text{Mg}^{++}$ ] poseen cargas netas positivas (cationes). La carga positiva de estos cationes se compensa con la presencia de aniones (con carga neta negativa), de los cuales los más influyentes son los

bicarbonatos  $[\text{HCO}_3^-]$  y los carbonatos  $[\text{CO}_3^{2-}]$ . Este anión tiene su origen en el dióxido de carbono  $[\text{CO}_2]$  disuelto naturalmente en el agua.

Los iones con cargas netas opuestas intervienen en un buen número de fenómenos químicos, entre ellos en la cristalización (origen de las incrustaciones calcáreas) y en las reacciones electroquímicas de oxidación (origen de la corrosión galvánica). Ambos procesos ocurren de forma espontánea siempre que participen en el sistema compuestos salinos, agua, oxígeno disuelto, un medio ácido, y la superficie, metálica o no metálica, propensa a recibir las incrustaciones.

Las causas que provocan las incrustaciones son:

- Cambios químicos

La pérdida de solubilidad de una especie química está relacionada con los efectos del calor y la presión del sistema. La especie química soluble a una determinada temperatura precipita o co-precipita cuando alcanza otra cierta temperatura. Esta pérdida de solubilidad está asociada a la constante de solubilidad de cada especie en particular.

- La solubilidad dependiente de la temperatura

Es común que una sal aumente su grado de disolución cuando aumenta la temperatura siendo ésta una coligativa de la solución, sin embargo, las sales de Ca, Mg, Fe y Si actúan en forma inversa, es decir, disminuyen su solubilidad y precipitan, la temperatura crítica es alrededor de 75-80  $[\text{°C}]$  (dependiendo de la presión atmosférica). Estas sales comúnmente encontradas en agua corriente constituyen la llamada dureza temporal del agua.

En el estudio de la formación de la cal en las conducciones y en los sistemas de agua caliente, se ha determinado que las incrustaciones compuestas principalmente por carbonatos de calcio y magnesio requieren la presencia de sílice, alúmina o sulfato de calcio, que actúan como cementadores, al igual que ocurre en la naturaleza. Los

coloides incluyendo sílice, alúmina y arcilla, cuando están en suspensión en el agua, frecuentemente llevan carga negativa. Si esta carga negativa (exceso de electrones) es neutralizada, los coloides coagulan, precipitan y se combinan o son absorbidos por los carbonatos de calcio, magnesio y sulfato cálcico: estas son las típicas incrustaciones calcáreas. El grosor y dureza de las incrustaciones aumenta cuando son mayores las concentraciones de sílice, alúmina o sulfato de calcio. La capacidad termoaislante de 1 [m/m] de cal es equivalente a 7,5 [cm] de hierro.

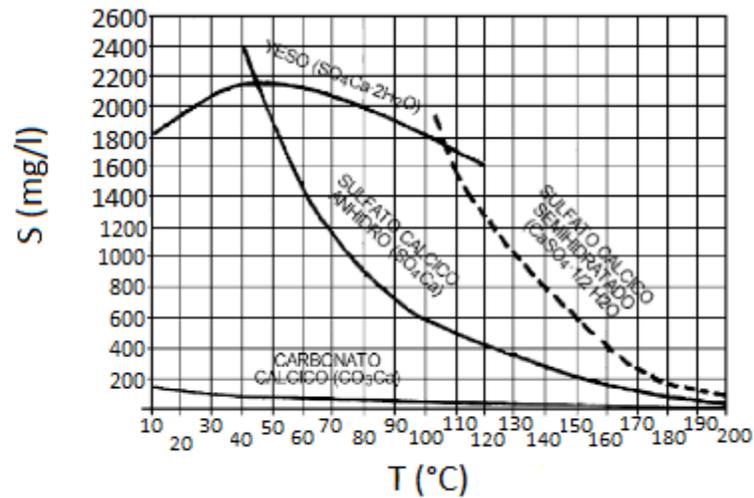


Fig. 2.3: Comparación entre solubilidades en equilibrio con un contenido normal de  $CO_2$  en la atmósfera. [4]

## **2.4 ANALISIS TERMODINÁMICO**

Físicamente, los procesos de incrustación calcárea se manifestarán en la red de tuberías y otros elementos de las instalaciones por la formación de costras calcáreas constituidas por los cristales insolubles de carbonato de cálcicos y magnésicos procedentes de la sobresaturación de la disolución en el agua, al ser bajo el contenido de ácido carbónico equilibrante.

### **2.4.1 Formación de incrustaciones calcáreas**

Dado que la incrustación es un proceso ligado al menos contenido de dióxido de carbono o anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) en el agua, resulta evidente que los circuitos de agua caliente en los que del  $\text{CO}_2$  se ha separado de la misma, serán más conflictivos desde el punto de vista de la incrustación, que los de agua fría.

De acuerdo a Tillman y, en función del Ph y del contenido en  $\text{CO}_2$  libre, el fenómeno de la incrustación viene marcado, de forma prioritaria, por la naturaleza temporal del agua de que se trate.

A diferencia de lo que ocurre en el fenómeno de la corrosión, el fenómeno de la incrustación calcárea es un problema propio del agua, es decir, se manifiesta con total independencia del tipo de material con que está constituida la tubería.

Conviene apuntar, dada la gran importancia del hecho, que si bien, como se ha indicado, el material de la conducción no tiene ninguna relación con el fenómeno de incrustación calcárea, éste si puede influir en los procesos de deposición.

Dada la gran disparidad entre los coeficientes de dilatación de los distintos materiales utilizados en las conducciones de agua, es de prever, en aquellos que lo tengan alto, un desprendimiento de las incrustaciones calcáreas por diferencias de dilatación, que provocaran en su arrastre obturaciones en elementos como válvulas, filtros, etc. Y en

general en todos aquellos puntos de la conducción donde se produzcan variaciones bruscas de la sección.

La deposición de las incrustaciones calcáreas en el interior de los sistemas afecta a los circuitos de varias maneras:

- Disminución del caudal, hasta llegar a hacerlo nulo, debido al crecimiento del espesor de la capa calcárea.
- Corrosión irreversible de toda superficie metálica presente en el circuito hasta su deterioro total.
- Necesidad de cambiar tramos completos de tuberías del circuito de agua, piezas y partes de los equipos afectados por las incrustaciones y/o la corrosión.
- Pérdida de entre 40 y 90% de la efectividad del sistema de transferencia de calor debido al aislamiento térmico provocado por las incrustaciones, fenómeno que se observara por ejemplo en las calderas y en los aparatos calefactores de agua, intercambiadores de calor.

La formación de incrustaciones comienza cuando se perturba el estado de cualquier fluido natural de forma tal que se excede el límite de solubilidad de uno o más de sus componentes y se precipitan en una superficie. La sal más abundante es el bicarbonato de calcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ), que no existe en estado sólido y que se encuentra de forma inestable en una solución acuosa que tiende a precipitarlo.

Si bien el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) forman la mayor parte de las incrustaciones, requieren, como se ha indicado, de otros componentes, como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que actúen como aglomerantes para que sean retenidos sobre las paredes.

Para mantener el bicarbonato de calcio en la solución, que es lo conveniente, resulta necesario que exista cierta cantidad de dióxido de carbono libre que equilibre la reacción y haga retroceder la precipitación. Una vez que se ha producido la precipitación ocurre el proceso de nucleación, mediante el cual se forman cristales de

tamaño diminuto que aprovechan cualquier traza de sustancia extraña. Los cristales se forman inicialmente en regiones minúsculas de la fase inicial, y después se propagan y aumentan en ella hasta hacerse visibles. Las solubilidades de los minerales en sí misma tienen, además, una complicada dependencia respecto a la temperatura y la presión.

Para fines prácticos, la presión externa no tiene influencias sobre la solubilidad de líquidos y sólidos, pero sí influye, como ya se ha indicado, sobre la solubilidad de los gases según la Ley de Henry: la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión del gas sobre la disolución.

Por otra parte, el efecto de agregar determinada concentración de un ion que es común con uno de los iones de la sal cuando ambos se encuentran en la misma solución (efecto del ion común) da como resultado la disminución de la solubilidad. El ion común desplaza el equilibrio de acuerdo con el principio de La Chatelier.

En resumen, el punto de partida para la formación de las incrustaciones está relacionado con un aumento de la temperatura de la disolución, un aumento de la acidez del fluido y la carencia de  $\text{CO}_2$  en el agua. El fenómeno de incrustación se produce con independencia del material con el que esté construida la red. Sin embargo, la baja reactividad química de los materiales de síntesis favorece que el volumen de sedimentaciones calcáreas o incrustaciones en las tuberías sea muy inferior al observado en tuberías metálicas, donde puede ocurrir una significativa reducción de la sección interior.

Para que el seno de una disolución se produzca la precipitación y cristalización de un sólido determinado es necesario que se cumplan tres condiciones:

- a) Que la disolución este sobresaturada
- b) Que se formen gérmenes o núcleos del sólido
- c) Que los cristales crezcan.

La primera condición es un requisito termodinámico imprescindible, de lo contrario no se produciría la precipitación o se disolverá el precipitado existente. La concentración de saturación se alcanza cuando el producto iónico de los iones en disolución es igual al producto de solubilidad para una composición y temperatura determinada. Si el producto iónico es mayor que el producto de solubilidad se dice que la solución está sobresaturada y es posible la precipitación. Si por el contrario es menor no será posible la precipitación y habrá disolución del precipitado.

En cuanto a la segunda condición, en muchas ocasiones no es suficiente que una solución esté saturada para que se produzca la precipitación, es necesario que se venza la resistencia cinética a la nucleación o energía de activación de la nucleación. La nucleación comienza con la formación de un pequeño agregado de iones y o moléculas en la disolución que crece hasta que se forma una fase sólida diferenciada. La formación de estos núcleos depende en gran medida de factores intrínsecos a la propia naturaleza del sólido en formación, pero en líneas generales puede afirmarse que a mayor concentración de la disolución y mayor temperatura más favorecida estará la formación de núcleos.

El crecimiento de los cristales depende por tanto de la sobresaturación de la disolución y de la cantidad de núcleos que se hayan formado. A sobresaturaciones relativas muy grandes la velocidad de nucleación es mayor que la velocidad de crecimiento, por lo que se forman muchos núcleos, pero crecen poco. Por el contrario, cuando la sobresaturación no es demasiado alta, la velocidad de crecimiento es mayor a la de nucleación, formándose en este caso menos núcleos, pero cada uno de ellos dará lugar a cristales mayores que en la situación anterior. Por otra parte, las condiciones de sobresaturación determinan la fase mineral estable que va a precipitar en función de los componentes presentes en la disolución.

La incrustación de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es una sal inorgánica de color blanco (todas las sales de calcio lo son) de densidad variable entre 2,72 y 2,92 [ $\text{gr/cm}^3$ ]. Sus formas minerales son:

- Calcita: Tiene características termodinámicas estables, cristales de forma romboédrica, simetría trigonal, sistema cristalino trigonal, dureza 3 densidad 2,72.
- Aragonita: Cristales de forma de aguja, simetría ortorrómbica, sistema cristalino ortorrómbico, dureza 3,5-4, densidad 2,95 y es 1,5 veces más soluble que la calcita.
- Vaterita: Cristales de forma hexagonal redondeados, metaestable con relación a la calcita y a la aragonita, aproximadamente 3,7 veces más soluble que la calcita y 2,5 veces más soluble que la aragonita.
- Forma amorfa: Sólido carente de estructura cristalina.

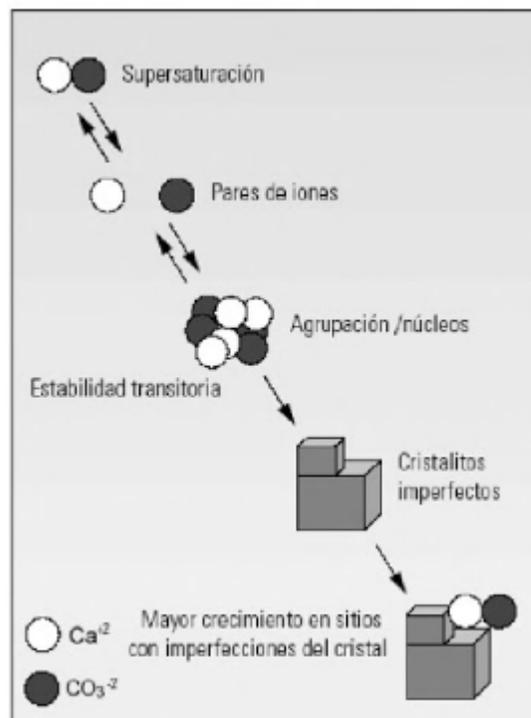


FIG. 2.4: Nucleación homogénea. [4]

Los cristales de calcita química de las incrustaciones forman literalmente miles de formas geométricas diferentes combinando las formas básicas de los romboedros positivos, los romboedros negativos, los romboedros ligeramente inclinados y en punta, varios escaledros y prismas. Existen más de 300 formaciones de cristales

identificados en la calcita, y tales formaciones se pueden combinar para producir las miles de variaciones de cristales diferentes.

Para que una incrustación provoque severos inconvenientes se deben cumplir tres condiciones: termodinámica, cinética y fluido-dinámica.

A continuación, se presentan las condiciones termodinámicas y las cinéticas de la incrustación más frecuente en aguas de distribución.

La reacción de formación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ):



$$\frac{(\text{Ca}) \times (\text{CO}_3)}{(\text{CaCO}_3)} = K_{sp} \quad (\text{Ec.2.4.2})$$



Donde  $K_{sp}$  es la constante del producto de solubilidad.

La fuerza de empuje de la reacción de formación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) está definida por el nivel de saturación del sistema (NS).

$$\text{NS} = \frac{(\text{Ca}) \times (\text{CO}_3)}{K_{sp}} \quad (\text{Ec.2.4.3})$$



NS = 1: Equilibrio

NS < 1: Subsaturada en  $\text{CaCO}_3$

NS > 1: Sobresaturados en  $\text{CaCO}_3$

Todo concepto de equilibrio tal como el del nivel de saturación del sistema (NS) describe lo que podría suceder en condición estática si la disolución fuese mantenida quieta por un tiempo infinito. La formación de incrustaciones ocurre en tiempos cortos y finitos en los que no se alcanza el equilibrio en estado estacionario. Los métodos termodinámicos de equilibrio no tienen en cuenta el tiempo de la reacción ni el de su dependencia de la temperatura (sólo considera la solubilidad a una temperatura y/o presión y/o salinidad definida).

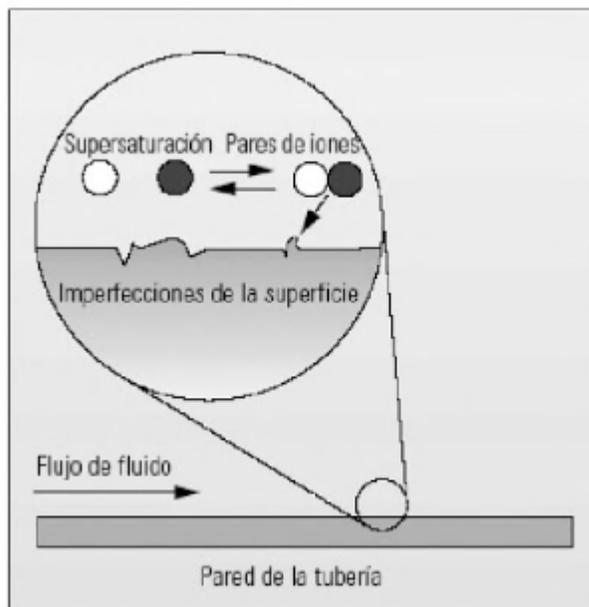


Fig. 2.5.: Nucleación heterogénea. [4]

El punto de partida para la formación de las incrustaciones puede ser un cambio de temperatura o de presión, la liberación de gas o una modificación del Ph. Dicho esto, también existen aguas que a pesar de encontrarse sobresaturadas y ser proclives a las incrustaciones, no presentan problema alguno. En una solución pura las reacciones son:

1. Formación de grupos de átomos inestables con colisión entre iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{CO}_3^-$ , formando grupos de átomos inestables formando algunos de ellos racimos (la frecuencia de las colisiones es función de la temperatura), proceso denominado nucleación homogénea (Fig. 2.4). También puede ocurrir sobre defectos preexistentes en las superficies, como rugosidades en la superficie de la tubería en contacto con el agua, denominada nucleación heterogénea (Fig. 2.5).
2. La fase sólida continúa colisionando con iones disueltos, algunos racimos pueden disolverse, otros crecen.
3. Los racimos alcanzan un tamaño crítico y se forma un núcleo estable (semillero de cristales) provocados por fluctuaciones locales en el equilibrio de las concentraciones de iones en las soluciones sobresaturadas. Superada una barrera de energía se produce el crecimiento espontáneo debido a que el núcleo provee un sustrato de crecimiento.
4. Los cristales precipitan y crecen por adsorción de iones sobre las imperfecciones de las superficies de los cristales, con lo cual aumenta el tamaño del cristal. La barrera de energía disminuye con el aumento del grado de sobresaturación, cuando ésta aumenta, la probabilidad de precipitación aumenta con otros parámetros constantes.

La energía necesaria para que el cristal crezca proviene de una reducción de la energía libre superficial, que disminuye rápidamente a medida que aumenta el radio, una vez superado un cierto radio crítico. Esto implica que los cristales grandes tienden al continuo crecimiento y además que los cristales pequeños se pueden disolver. Por lo tanto, dado un cierto grado de sobresaturación, la formación de cualquier semillero de

cristales va a favorecer el aumento del crecimiento de incrustaciones. El semillero de cristales de hecho actúa como un catalizador de la formación de incrustaciones.

Los lugares en los que se produce la nucleación heterogénea incluyen los defectos en las superficies, como las citadas rugosidades, incluso en las juntas y las soldaduras de las tuberías. Un alto grado de turbulencia también puede hacer las veces de catalizador para el depósito de sedimentos.

En una instalación o en un equipo, las soluciones no son ideales, óxidos, sulfuros y otros elementos presentes reducen la barrera de energía y facilitan la precipitación a más bajos niveles de sobresaturación.

Los inhibidores de incrustación elevan la barrera de energía, su adsorción dentro de los sitios activos de crecimiento de cristales es la base de los tratamientos de control de las incrustaciones.

Tal como se establece al analizar el equilibrio del dióxido de carbono, el carácter incrustante de un agua se pone de manifiesto cuando el contenido de ácido carbónico equilibrante es inferior al correspondiente al de las condiciones de equilibrio del sistema y determinado por el pH, la temperatura, etc.

Se ha dicho que la incrustación calcárea está ligada a los carbonatos y a los bicarbonatos, y que cuando un agua presenta una dureza bicarbonatada elevada, tiene también un alto poder de incrustación, ya que cualquier aumento de iones  $\text{OH}^-$  se compensa de acuerdo con la siguiente ecuación de equilibrio:



Los carbonatos por su parte cumplen con:



En el caso de que el agua sea de baja alcalinidad tiene un poder de incrustación pequeño con lo que un aumento en la concentración de los iones ( $\text{OH}^-$ ) no se compensa de forma adecuada. Se provoca entonces un aumento del valor del pH y una precipitación del carbonato cálcico.

El anhídrido carbónico tiene una gran importancia a los fenómenos de incrustación. Al disolverse en agua da lugar a la formación de ácido carbónico. El ácido carbónico reacciona entonces con la calcita para formar bicarbonato cálcico:



Esta reacción es reversible, con lo que se puede escribir:



Cuando se elimina el  $\text{CO}_2$  de forma parcial, por ejemplo, mediante un aumento de la temperatura, precipita el carbonato cálcico dando lugar a incrustaciones. Se comprende ahora que en los aparatos para el calentamiento del agua (calentadores

eléctricos, calentadores a gas, etc.) donde la temperatura es más elevada se produzca la obturación de los serpentines o de las tuberías.

El efecto de obstrucción de la tubería lleva consigo una disminución de caudal que puede llegar a hacer ineficaz al tubo. Otro factor que es importante es el del aumento energético preciso para conseguir el mismo nivel de temperatura, cuando existe incrustación calcárea. Así, por ejemplo, en un serpentín de un calentador instantáneo de agua que presente una incrustación calcárea de 9 [mm], se precisará de un 50% aproximadamente más de energía para conseguir la misma temperatura. La formación de incrustación calcárea depende, de varios factores tales como la temperatura que alcanza el agua, la velocidad de aumento de la temperatura y también del estado de rugosidad de la superficie donde circula.

El estado de rugosidad es el que ha llevado a considerar erróneamente que las instalaciones de agua sanitaria ejecutadas con tubería de paredes lisas, metálicas o no, se verían exentas de los problemas de incrustaciones calcáreas generados por agua incrustantes que no necesariamente tienen que ser duras. Hay que tener en cuenta que el fenómeno de incrustación se produce tanto en agua fría como en agua caliente y que un agua determinada puede ser agresiva en frío e incrustante en caliente o bien pasar a ser incrustante si era agresiva y ha sido sometida a un tratamiento de desgasificación. [4].

#### **2.4.2 Resistencia térmica**

Debido a que los objetivos de este estudio (Capítulo I, secciones 1.2 y 1.3), son la determinación de las causas de incrustaciones en componentes de sala de calderas específicas, donde la finalidad de estas instalaciones es la generación de agua caliente sanitaria (ACS), y dicha generación está basada en la transferencia de energía de calor desde un medio que tiene una temperatura más elevada a un medio de menor temperatura, es necesario definir y desarrollar los conceptos de dicho fenómeno de transferencia de energía, partiendo por la 1° Ley de la Termodinámica, hasta llegar a

las expresiones que nos permitirán definir los parámetros de control de las incrustaciones calcáreas.

La 1° Ley de la Termodinámica se puede expresar como:

$$E_{ENT} - E_{SAL} = \Delta E_{SIST} \quad (\text{Ec.2.4.8})$$

Para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso.

“Si se acota un sistema a un tramo de cañería, de un largo determinado, por donde pasa un flujo másico de agua hacia adentro y hacia afuera de la cañería, dicho tramo se considera como volumen de control. La mayor parte de los volúmenes de control se analizan en condiciones estacionarias de operación, es decir, que el cambio en la energía total del volumen de control es cero. Por tanto, la cantidad de energía que entra en un volumen de control en todas las formas (calor, trabajo, transferencia de masa) para un proceso de flujo estacionario debe ser igual a la cantidad de energía que sale de él. La cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de una cañería, por unidad de tiempo, se denomina gasto de masa ( $\dot{m}$ ) [Kg/s].

A menudo se puede considerar, en forma aproximada, que el flujo de un fluido por una cañería es unidimensional, es decir, se puede suponer que las propiedades varían sólo en una dirección (la del flujo). Como resultado, se supone que todas las propiedades son uniformes en la sección transversal perpendicular a la dirección del flujo y también se supone que las propiedades tienen valores promedio en masa sobre toda la sección transversal. Esto se puede expresar como:

$$\dot{m} = \rho v A_c \quad [\text{Kg/s}] \quad (\text{Ec.2.4.9})$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad promedio del mismo en la dirección del flujo y  $A_c$  es el área de la sección transversal de la cañería” [5].

Para un sistema de flujo estacionario con una entrada y una salida, la velocidad del flujo de masa hacia adentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad del

flujo de masa hacia afuera de él. Cuando los cambios en las energías cinéticas y potencial son despreciables, que es el caso más común, y no se tiene interacción de trabajo, el balance de energía para tal sistema de flujo estacionario queda expresada como:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad [\text{KW}] \quad (\text{Ec.2.4.10})$$

Donde  $\dot{Q}$  la velocidad de transferencia neta de calor hacia adentro o hacia afuera del volumen de control y fuera o dentro del volumen de control,  $\dot{m}$  es el flujo másico [Kg/sg],  $C_p$  es el calor específico del fluido a presión constante [KJ / Kg °C] (ver anexo 2) y  $\Delta T$  (diferencia de temperaturas) corresponde a:

$$\Delta T = T^\circ \text{ exterior} - T^\circ \text{ interior} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{Ec.2.4.11})$$

En este estudio se establecen volúmenes de control, cuyos límites se establecen en el capítulo IV (sección 4.1). El comportamiento de la transferencia de calor en nuestros volúmenes de control está determinado por las condiciones térmicas de la superficie a la entrada y salida de dichos volúmenes. Estas condiciones son las llamadas “condiciones de fronteras”. [5]

Estas condiciones de fronteras del volumen de control para los tres casos a estudiar corresponden a las paredes de cañerías.

La figura 2.6 esquematiza un volumen de control correspondiente a una tubería por la cual pasa un fluido.

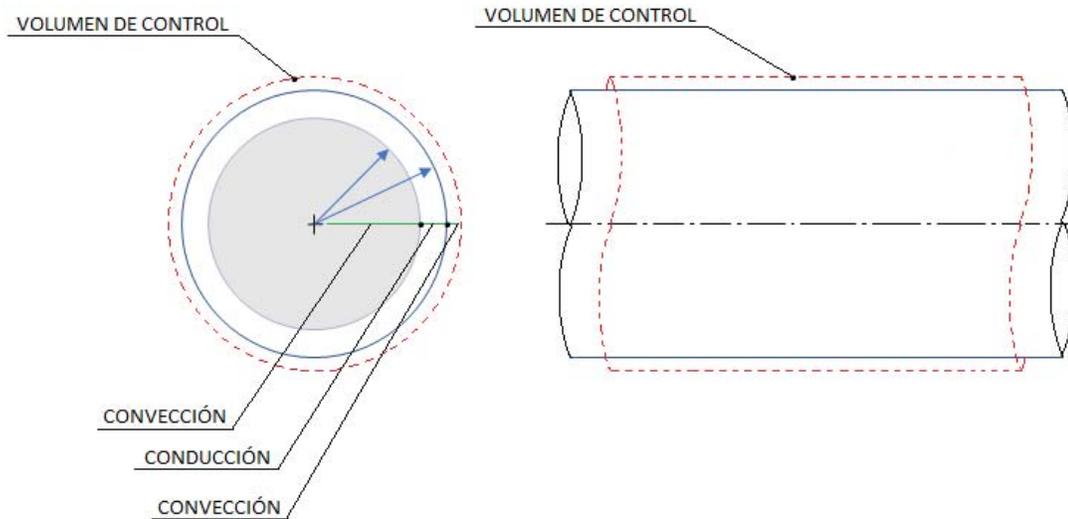


Fig. 2.6: Esquema volumen de control correspondiente a una tubería por la cual pasa un fluido.

Para este caso la transferencia de calor por convección, es la condición de frontera, debido a que la mayor parte de la superficie de la cañería se encuentra expuesta a un medio y a una temperatura específica. Esta condición de frontera es válida tanto para la superficie interior y exterior de la cañería.

El balance de energía se expresa como:

$$\left( \text{CONVECCION DE CALOR HACIA PARED INTERIOR} \right) = \left( \text{CONDUCCION DE CALOR A LO LARGO DE LA PARED} \right) = \left( \text{CONVECCIÓN DE CALOR EN LA SUPERFICIE EN LA MISMA DIRECCIÓN} \right)$$

En la ecuación 2.4.11 la expresión  $\Delta T = (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$ , donde  $T_{\text{int}}$  y  $T_{\text{ext}}$ , corresponden a las temperaturas medias del fluido en el interior y exterior de la cañería, respectivamente.

Las condiciones térmicas en la superficie interior de la cañería se pueden aproximar como temperatura en la superficie interior constante,  $T_{\text{sup intr.}} = \text{cte.}$  o también flujo de calor constante en la superficie interior  $\dot{q} = \text{cte.}$  pero no ambas condiciones.

En este estudio se considerará la temperatura de la superficie interior de la cañería constante.

Para la convección (mecanismo de transferencia de calor), la velocidad de transferencia de calor desde o hacia un fluido, que fluye dentro de un tubo se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{\text{CONVECCIÓN}} = h A_{\text{sup}} \Delta T_{\text{prom}} \quad [\text{KW}] \quad (\text{EC.2.4.12})$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio, cuya unidad de medida es  $[\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$ ,  $A_{\text{sup}}$  es el área superficial para la transferencia de calor (es igual a  $\pi D L$  para un tubo circular de longitud  $L$ ) y  $\Delta T_{\text{prom}}$  es alguna diferencia promedio apropiada de temperatura entre el fluido y la superficie interior.

“El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ , no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración

geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo” [5]. Ver anexo 3.

$\Delta T_{prom}$  se puede expresar como:

$$\Delta T_{prom} = \frac{(T_e - T_s) - (T_i - T_s)}{\ln \left[ \frac{(T_e - T_s)}{(T_i - T_s)} \right]} \quad (\text{EC.2.4.13})$$

Esta expresión se denomina diferencia de temperatura media logarítmica.

$T_e$  : Temperatura de entrada.

$T_i$  : Temperatura de salida.

Para la conducción (mecanismo de transferencia de calor), la velocidad de transferencia de calor a través de un medio en una dirección determinada (dirección x, por ejemplo) es proporcional a la diferencia de temperatura entre un lado y otro lado del medio, también proporcional al área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, pero inversamente proporcional a la distancia en esa dirección. Esto se expresa, gracias a la ley de Fourier sobre la conducción del calor en forma unidimensional, de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{\text{CONDUCIDO}} = - k A dt/dx \quad [\text{KW}] \quad (\text{Ec.2.4.14})$$

Donde k es la conductividad térmica del material del medio, que es la capacidad del material para conducir calor, su unidad de medida corresponde a [W / m \* °C].

$dt/dx$  es el gradiente de la curva de temperatura en función de la distancia, esta es negativa debido a que la temperatura disminuye a medida que avanza por una distancia  $x$ .

Para asegurar que el valor de la cantidad de calor de transferido en la dirección positiva  $x$  sea positivo, en la ecuación se antepone un signo (-).

El gradiente de la temperatura corresponde al valor de la pendiente de la curva  $T(x)$ , como se muestra en la siguiente figura:

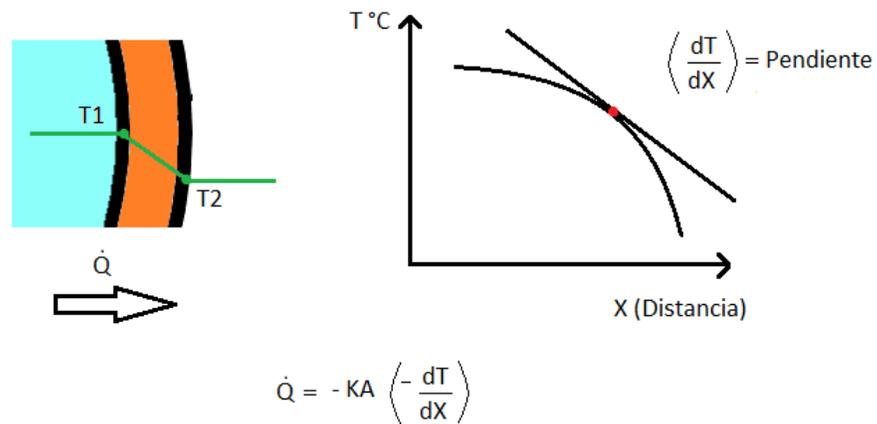


Fig. 2.7: Esquema gradiente de temperatura.

Si tomamos el esquema de la Fig. 2.6, y agregamos las expresiones para la transferencia de calor por convección y conducción, obtenemos el siguiente esquema:

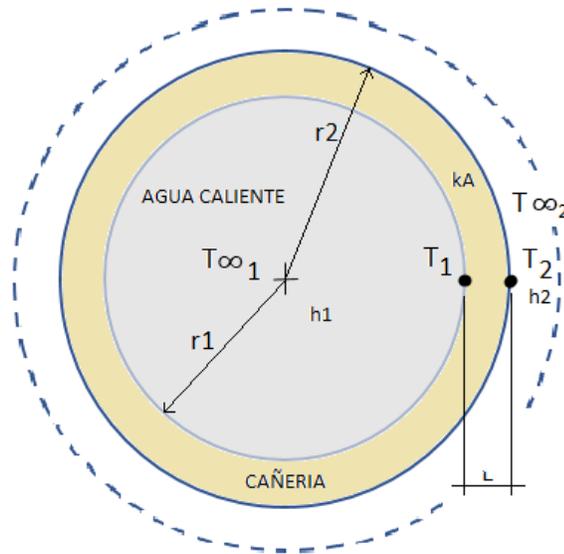


FIG. 2.8: Esquema transferencia de calor dentro de una tubería.

La figura 2.8 se representa en forma de ecuación de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) = k A \frac{T_1 - T_2}{L} = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad [\text{KW}] \quad (\text{Ec.2.4.15})$$

La transferencia de calor dentro del volumen de control tiene la siguiente naturaleza: por convección desde el fluido a la superficie interior de la cañería (condición de frontera), por conducción desde la superficie interior a la superficie exterior de la cañería y desde dicha superficie hasta el medio exterior (condición de frontera).

Como ya se indicó la conductividad térmica  $k$ , es la capacidad de un material para conducir calor, en este caso el material de la cañería. Debido a que la cañería posee

un espesor  $L$ , en dirección  $x$ , este espesor ofrece una resistencia al traspaso de calor desde la cara interior a la exterior, como se indica en la siguiente figura:

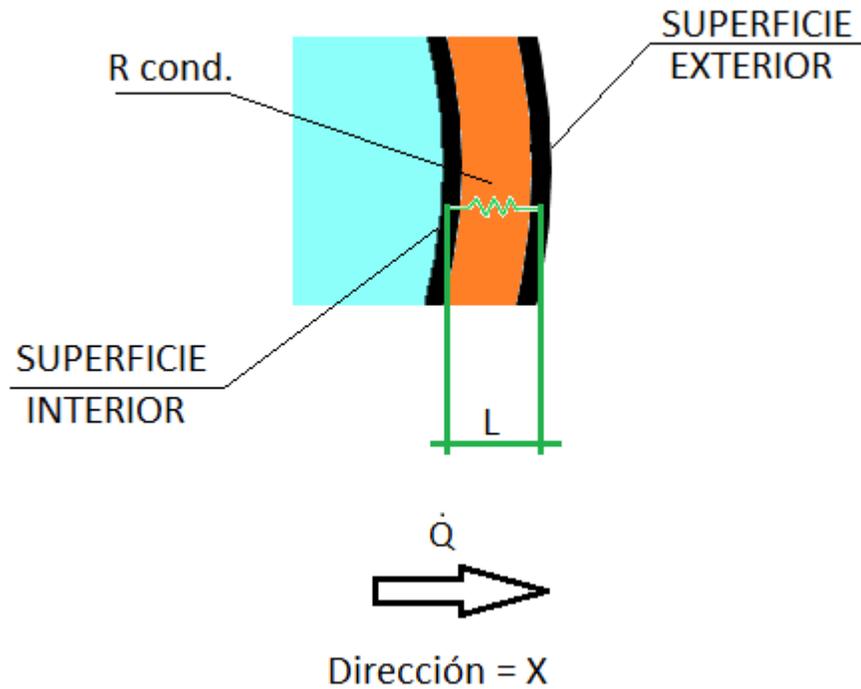


FIG. 2.9: Esquema de resistencia a la conducción en una cañería.

Esta resistencia que ofrece la pared de la cañería a la conducción de calor para un espesor  $L$ , se puede expresar de la forma:

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (\text{Ec.2.4.16})$$

En la transferencia de calor desde un fluido a la superficie interior de la cañería, también existe una resistencia de dicha superficie a recibir el calor por convección. Esta resistencia es inversamente proporcional al coeficiente de transferencia de calor

por convección y al área de la superficie de la cañería. Esto también se aplica para la transferencia de calor por convección desde la superficie exterior de la cañería y el fluido exterior. Esto se expresa de la siguiente forma:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (\text{Ec.2.4.17})$$

Si se introducen, convenientemente las ecuaciones 2.4.16 y 2.4.17 en la ecuación 2.4.15, se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{1/h_1 A} = \frac{T_1 - T_2}{1/KA} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{1/h_2 A} \quad (\text{Ec.2.4.18})$$

Luego,

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_{conv2}} \quad (\text{Ec.2.4.19})$$

Ahora, se agrupan las resistencias, reduciéndolas a una magnitud llamada Coeficiente global de transmisión del calor "U", cuya unidad de medida es [KW/m<sup>2</sup> °C].

Expresando la ecuación 2.4.19 en función de U

$$\dot{Q} = U A \Delta T \quad (\text{Ec.2.4.20})$$

$$UA = \frac{1}{R_{\text{CONV}} + R_{\text{COND}} + R_{\text{CONV}}} \quad [\text{KW}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{Ec.2.4.21})$$

Cuando en la superficie interior de la cañería empieza a generarse las incrustaciones, estas actúan como resistencia a la transferencia de calor que tiene como dirección desde el interior hasta el exterior de la cañería. Esta resistencia a la transferencia se puede cuantificar mediante el factor de incrustación  $R_f$  que se expresa de la siguiente manera:

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad [\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{KW}] \quad (\text{Ec.2.4.22})$$

Donde  $U_f$  y  $U_c$ , son los coeficientes globales de transferencia de calor para la condición de incrustación en la superficie interior de la cañería y para la condición de limpieza respectivamente.

A partir de la ecuación 2.4.20 obtenemos los coeficientes globales  $U_f$  y  $U_c$

$$U_f = \left[ \frac{Q}{A\Delta T_m} \right]_f \quad [\text{KW}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{Ec.2.4.23})$$

$$U_c = \left[ \frac{Q}{A\Delta T_m} \right]_c \quad [\text{KW}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{Ec.2.4.24})$$

Como se indicó en la ecuación 2.4.11, la expresión para la tasa de transferencia de calor  $\dot{Q}$  es:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T$$

Donde  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura de la superficie interior  $T_1$ , y la temperatura de la superficie exterior de la cañería  $T_2$ , luego  $\Delta T = (T_1 - T_2)$ .

El coeficiente global de transferencia de calor queda expresado la siguiente forma:

$$U = \frac{m \cdot C_p (T_1 - T_2)}{A \left[ \frac{(T_e - T_s) - (T_i - T_s)}{\ln \left\{ \frac{(T_e - T_s)}{(T_i - T_s)} \right\}} \right]} \quad [\text{KW/ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{Ec.2.4.25})$$

## **CAPÍTULO III**

### **DEFINICIÓN CENTRALES TÉRMICAS PARA EL ESTUDIO**

Las centrales térmicas seleccionadas se encuentran ubicadas en edificios de departamentos habitacionales, su función es el suministro de agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción en departamentos y áreas comunes.

Los edificios se encuentran en la región Metropolitana, en las comunas de San Miguel, Santiago y Providencia.

#### **3.1 SALA DE CALDERAS DE EDIFICIO CASO 1**

Descripción general

Ubicación: Primera Transversal 5875, comuna San Miguel, región Metropolitana.

Característica:

Edificio de 16 pisos, y 2 subterráneos

1° piso: recepción y 2 baños para el personal.

2° piso hasta piso 16°: 6 departamentos por piso.

1° subterráneos: sala de calderas.

2° subterráneos: sala de bombas.

Esta sala de calderas cumple con la función de generar agua caliente sanitaria y agua caliente para calefacción de departamentos y áreas comunes del edificio.

En la siguiente tabla se indican los equipos y sus características principales:

ITEM	EQUIPO	CANT.	MARCA	MODELO	POTENCIA TERMICA [Kcal/hr]	POTENCIA TERMICA UTIL [Kcal/hr]	TEMPERATURA MAXIMA	CAPACIDAD [M3]	OBSERVACIONES
1	CALDERA	2	IVAR	SUPER RAC 345	330.187	300.086	100 [°C]	-	
2	QUEMADOR	2	RIELLO	RS 40	175.000-473.000	-		-	
3	BOMBA CIRCUITO PRIMARIO	2	DAB	CM50/1270 TIE2	-	-	-	-	
4	BOMBA CALEFACCION	2	DAB	CM50/1270 TIE2	-	-	-	-	
5	INTERCAMBIADOR DE CALOR	2	CIPRIANI	PLACA CONTRAFLUJO P-125	-	-	-	-	
6	ESTANQUE ACS	2	-	-	-	-	-	50	
7	BOMBA RECIRCULACION	2	DAB	KLP 800 T	-	-	-	-	UNA BOMBA PARA CADA ESTANQUE
8	BOMBA RECIRCULACION COLUMNA	2	DAB	KLP 800 T	-	-	-	-	UNA BOMBA PARA CADA ESTANQUE

TABLA 3.1: Equipos sala de calderas, caso 1.

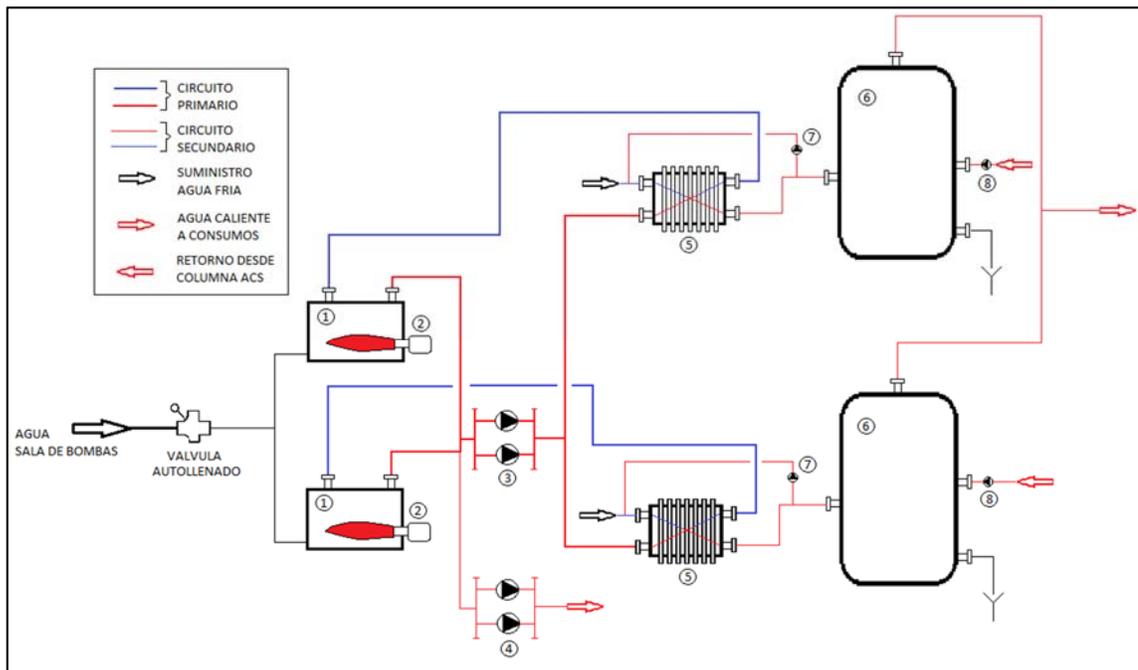


FIG. 3.1: Diagrama de flujo sala de calderas. Los números indicados en cada componente corresponden a los ítems enumerados en la tabla 3.1

### 3.2 SALA DE CALDERAS DE EDIFICIO CASO 2

Descripción general

Ubicación: José Miguel Carrera 424, comuna Santiago, región Metropolitana.

Característica:

Edificio de 9 pisos, y 2 subterráneos

1° piso: recepción y 1 baños para el personal, 4 departamentos.

2° piso hasta 9° piso: 8 departamentos por piso.

10° piso: sala de calderas.

1° subterráneos: sala de bombas.

Esta sala de calderas cumple con la función de generar sola agua caliente sanitaria sin calefacción.

En la siguiente tabla se indican los equipos y sus características principales:

ITEM	EQUIPO	CANT.	MARCA	MODELO	POTENCIA TERMICA [Kcal/hr]	POTENCIA TERMICA UTIL [Kcal/hr]	TEMPERATURA MAXIMA	CAPACIDAD [M3]	OBSERVACIONES
1	CALDERA	2	IVAR	SUPER RAC 345	330.187	300.086	100 [°C]	-	
2	QUEMADOR	2	RIELLO	RS 40	175.000-473.000	-		-	
3	BOMBA CIRCUITO PRIMARIO	3	DAB	80 / 180 XM	-	-	-	-	
4	ESTANQUE ACS	3	ACV	TANK IN TANK HR-601	-	-	-	0,6	
5	BOMBA RECIRCULACION	1	DAB	50 / 180 XM	-	-	-	-	

TABLA 3.2: Equipos sala de caderas, caso 2.

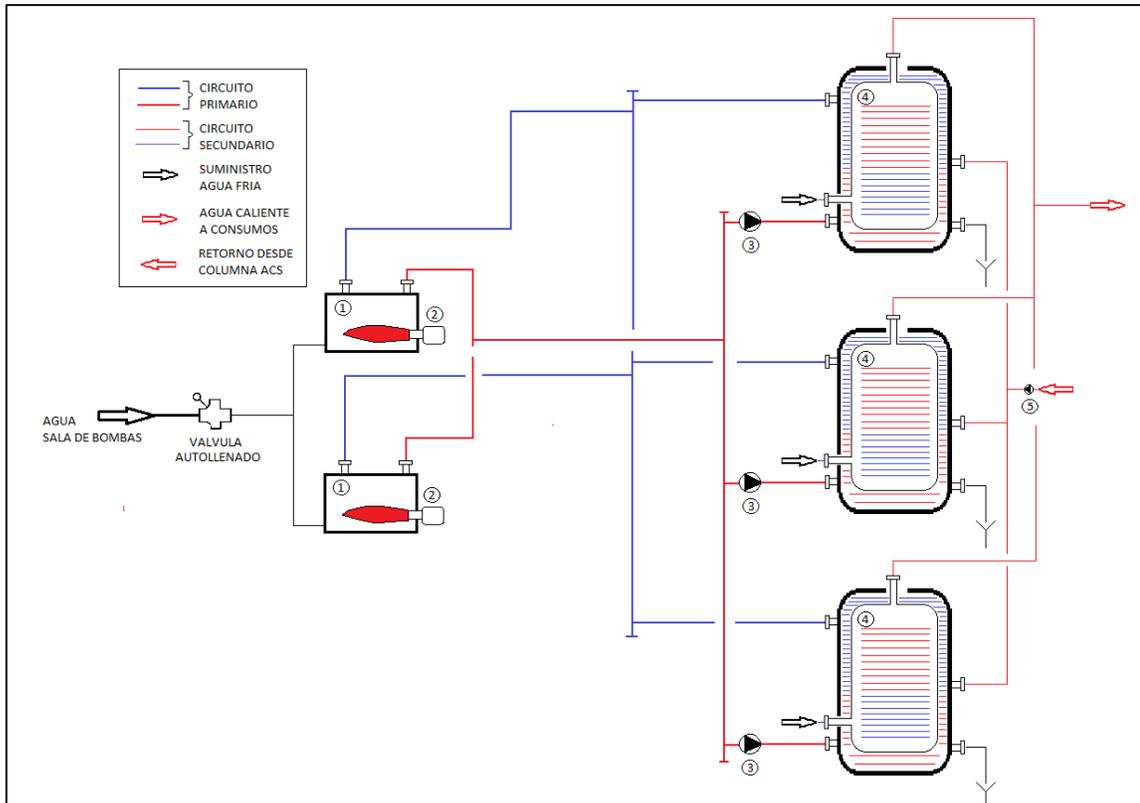


FIG. 3.2: Diagrama de flujo sala de calderas. Los números indicados en cada componente corresponden a los ítems enumerados en la tabla 3.2

### 3.3 SALA DE CALDERAS DE EDIFICIO CASO 3

Descripción general

Ubicación: Ricardo Lyon1796, comuna Providencia, región Metropolitana.

Característica:

Edificio de 12 pisos, y 2 subterráneos

1° piso: recepción y 1 baños para el personal, 4 departamentos

2° piso hasta 11° piso: 8 departamentos por piso.

1° subterráneos: sala de calderas.

2° subterráneos: sala de bombas.

Esta sala de calderas cumple con la función de generar agua caliente sanitaria y agua caliente para calefacción de departamentos y áreas comunes del edificio.

ITEM	EQUIPO	CANT.	MARCA	MODELO	POTENCIA TERMICA [Kcal/hr]	POTENCIA TERMICA UTIL [Kcal/hr]	TEMPERATURA MAXIMA	CAPACIDAD [M3]	OBSERVACIONES
1	CALDERA	2	BIASI	NTN - AR250	330.187	249.355	100 [°C]	-	
2	QUEMADOR	2	RIELLO	RS 38	90.284-378.331	-		-	
3	BOMBA CIRCUITO PRIMARIO	2	DAB	DKLP40/1200T	-	-	-	-	
4	BOMBA CALEFACCION	1	DAB	DKLP80/1200T	-	-	-	-	SIAMESA
5	INTERCAMBIADOR DE CALOR	2	CIPRIANI	PLACA CONTRAFLUJO P-040	-	-	-	-	
6	ESTANQUE ACS	2	-	-	-	-	-	20	
7	BOMBA RECIRCULACION COLUMNA	2	DAB	VS 65/150	-	-	-	-	UNA BOMBA PARA CADA ESTANQUE

TABLA 3.3: Equipos sala de caderas, caso 3.

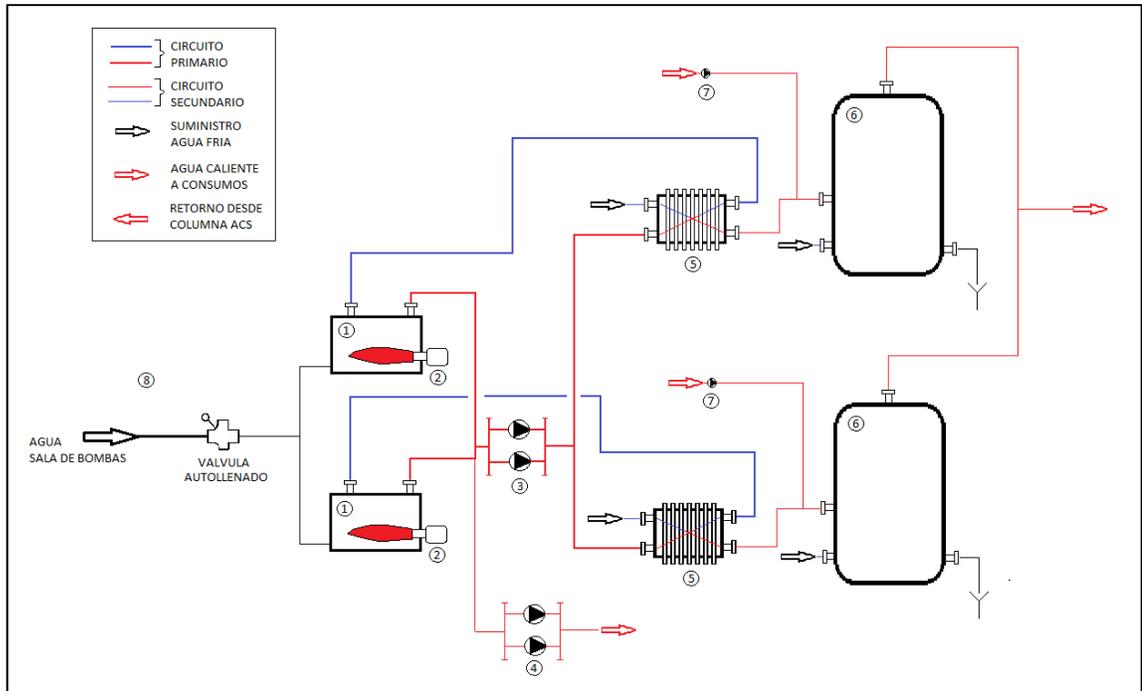


FIG. 3.3: Diagrama de flujo sala de calderas. Los números indicados en cada componente corresponden a los ítems enumerados en la tabla 3.3

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO MODELO DE VOLUMEN DE CONTROL EXPERIMENTAL PARA CADA SALA DE CALDERAS**

#### **4.1 DEFINICIÓN VOLUMEN DE CONTROL**

En el capítulo III, en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se indican los diagramas de flujos para cada sala de calderas, dentro de estos, se encuentran las áreas que se establecerán como volúmenes de control para el desarrollo del modelo experimental para cada caso.

Lo volúmenes de control corresponden a un tramo determinado de cañería, ubicada en cierta posición entre intercambiador de calor y estanque acumulador de agua caliente sanitaria.

Se aprovecha la condición de que estos tramos, para el caso de las tres salas de calderas, se encuentran con incrustaciones calcáreas y es necesario el reemplazo de dichos tramos para el buen funcionamiento de las centrales.

Los costos económicos de estos trabajos son solventados por cada comunidad de edificio, después de la aprobación de los respectivos presupuestos de suministro y reemplazo de cañerías.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se entiende que los volúmenes de control, al inicio del monitoreo de temperaturas se encuentran completamente libres de incrustaciones.

#### 4.1.1 Volumen de control caso 1

La figura 4.1 corresponde al diagrama de piping e instrumentación o P & ID de la sala de calderas. En este se establece el volumen de control seleccionado, el cual corresponde al tramo de cañería comprendido entre la salida de agua caliente sanitaria del intercambiador N°1 y la entrada al estanque acumulador N°1. Este tramo de cañerías junto con sus componentes, válvulas y fittings son reemplazados por materiales nuevos, adicionando un medidor de temperatura termopar, el cual, junto con un procesador de datos, permitirá registrar las temperaturas de la superficie de la cañería en un periodo determinado de tiempo.

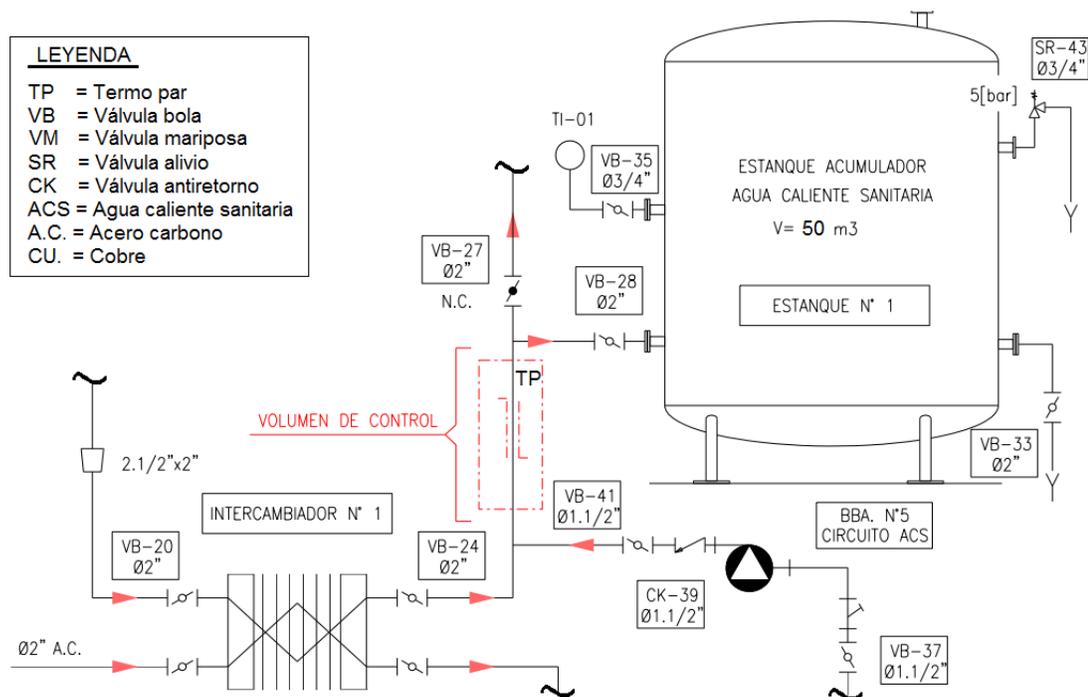


FIG. 4.1: Parte del diagrama de piping e instrumentación de sala de calderas edificio caso 1.  
Plano completo ver Anexo. 4

En la tabla 4.1 se describen los componentes instalados y sus características técnicas.

ITEM	EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD
1	REDUCCION COBRE 2 1/2" x 2"	1	c/u
2	TEE COBRE 2"	1	c/u
3	UNION AMERICANA HE 2" BRONCE	1	c/u
4	TERMINAL HE 2" BRONCE	2	c/u
5	CODO COBRE 2"	1	c/u
6	CAÑERÍA COBRE 2" TIPO K	2	[m]
7	TERMINAL HI 2 1/2" BRONCE	1	c/u
8	VALVULA BOLA 2"	1	c/u

Tabla 4.1: Componentes y sus características.

Para el caso del tramo de cañería de cobre, este es del tipo “cañería de cobre tipo K”, sus características son las siguientes:

Diámetro nominal: 2”.

Diámetro exterior: 53,98 [mm].

Diámetro interior: 49,76 [mm].

Espesor: 2,11 [mm].

Presión máxima: 484 [lbs].

Aleación: DHP (C122)

99,9% Cu; 0,015-0,040% P.

Tolerancia espesor:  $\pm 10\%$ .

Norma: ASTM B88.

NCH 951.

Sin costura.

Conductividad térmica: 340 [W/m\*°C].

Proveedor: Impovar.

Estas características son válidas, también, para los volúmenes de control de los casos 2 y 3.

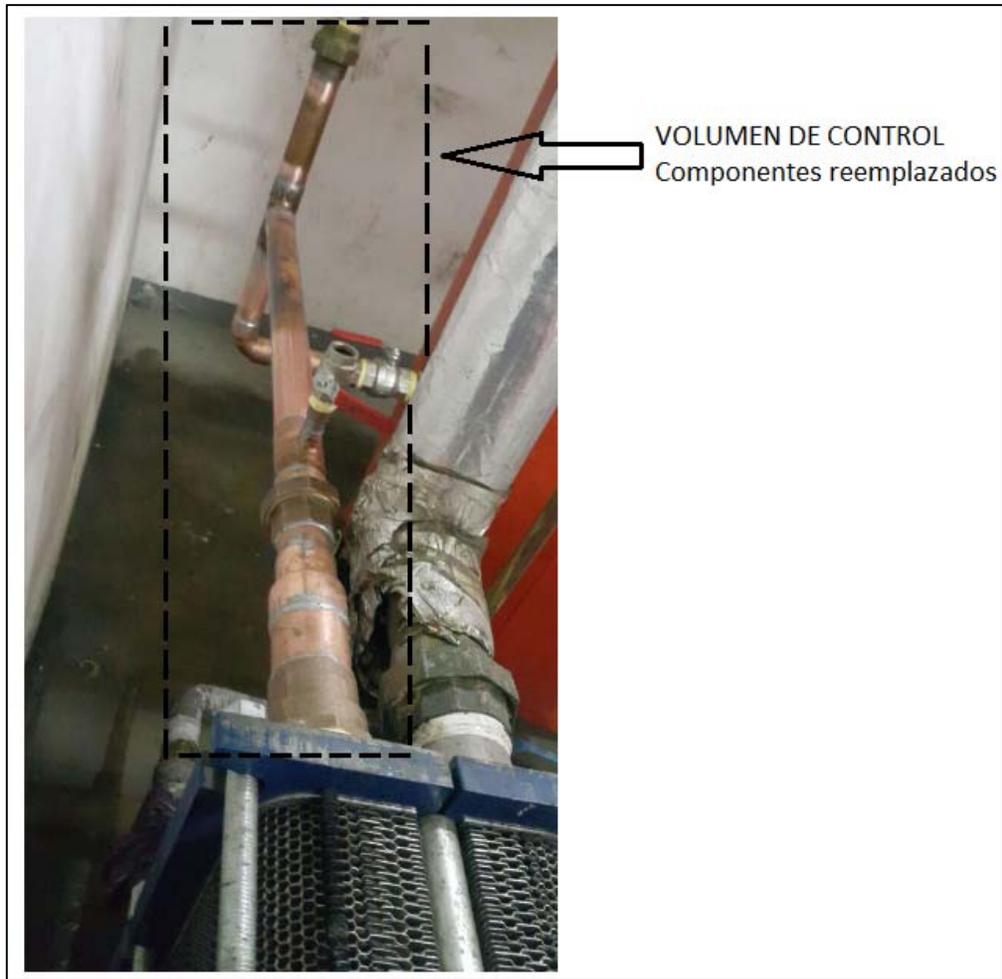


Fig. 4.2: Volumen de control.

#### 4.1.2 Volumen de control caso 2

Al igual que en el caso 1, la figura 4.3 correspondiente al diagrama de piping e instrumentación o P&ID muestra el volumen de control seleccionado, el cual corresponde al tramo de cañería comprendido entre manifold de agua caliente circuito primario y la entrada de estanque Tank in tank N°1. Nuevamente igual que en caso 1, este tramo de cañerías junto con sus componentes, válvulas y fittings son reemplazados por materiales nuevos, adicionando un medidor de temperatura termopar, el cual, junto con un procesador de datos, permitirá registrar las temperaturas de la superficie da la cañería en un periodo determinado de tiempo.

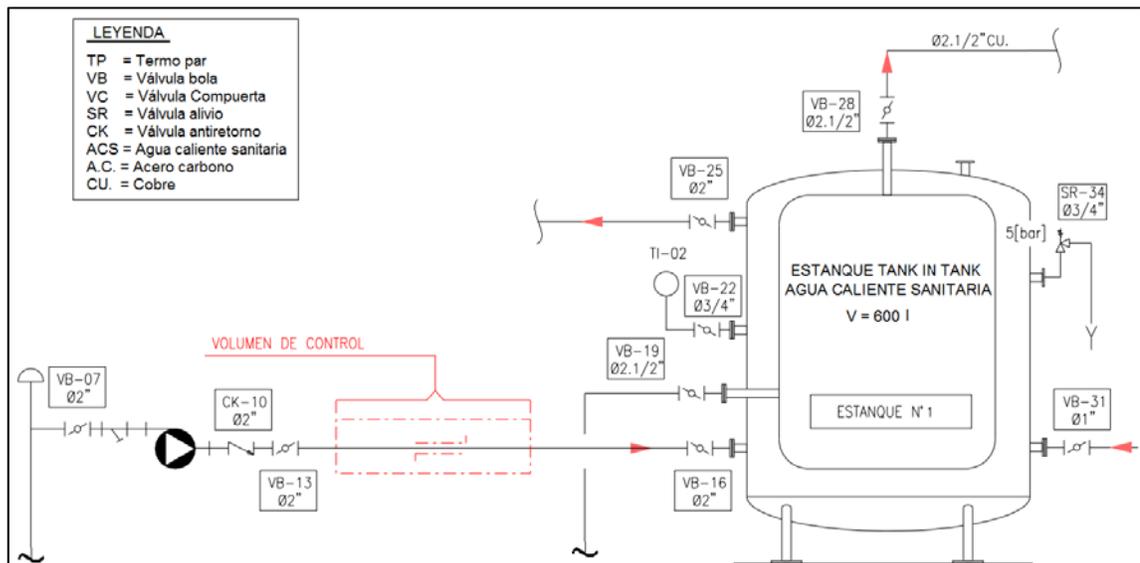


Fig. 4.3: Parte del diagrama de piping e instrumentación de sala de calderas edificio caso 2.  
Plano completo ver Anexo 5.

En la tabla 4.2 se describen los componentes instalados y sus características técnicas.

ITEM	EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD
1	REDUCCION COBRE 2 1/2" x 2"	1	c/u
2	TEE COBRE 2"	1	c/u
3	UNION AMERICANA HE 2" BRONCE	1	c/u
4	TERMINAL HE 2" BRONCE	2	c/u
5	CODO COBRE 2"	1	c/u
6	CAÑERIA COBRE 2" TIPO K	2	[m]
7	TERMINAL HI 2 1/2" BRONCE	1	c/u
8	VALVULA BOLA 2"	1	c/u

Tabla 4.2: Componentes y sus características.

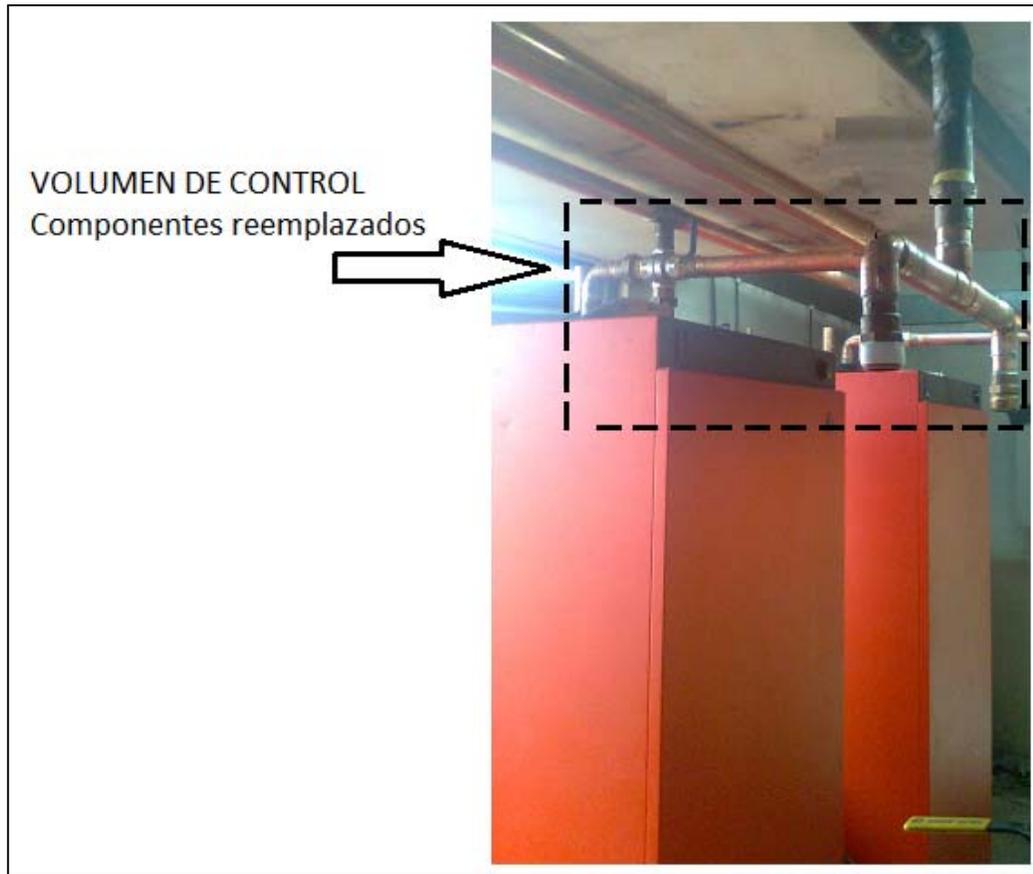


Fig. 4.4: Volumen de control.

### 4.1.3 Volumen de control caso 3

La figura 4.5 corresponde al diagrama de piping e instrumentación o P&ID, donde se indica la posición del volumen de control para el caso 3. Este corresponde al tramo de cañería desde la salida del intercambiador de placas N°1 a la entrada del estanque acumulador N°1. De igual manera que en los casos 1 y 2, este tramo de cañería junto con sus componentes, válvulas y fittings son reemplazados por materiales nuevos, adicionando un medidor de temperatura termopar, el cual, junto con un procesador de datos, permitirá registrar las temperaturas de la superficie de la cañería en un periodo determinado de tiempo.

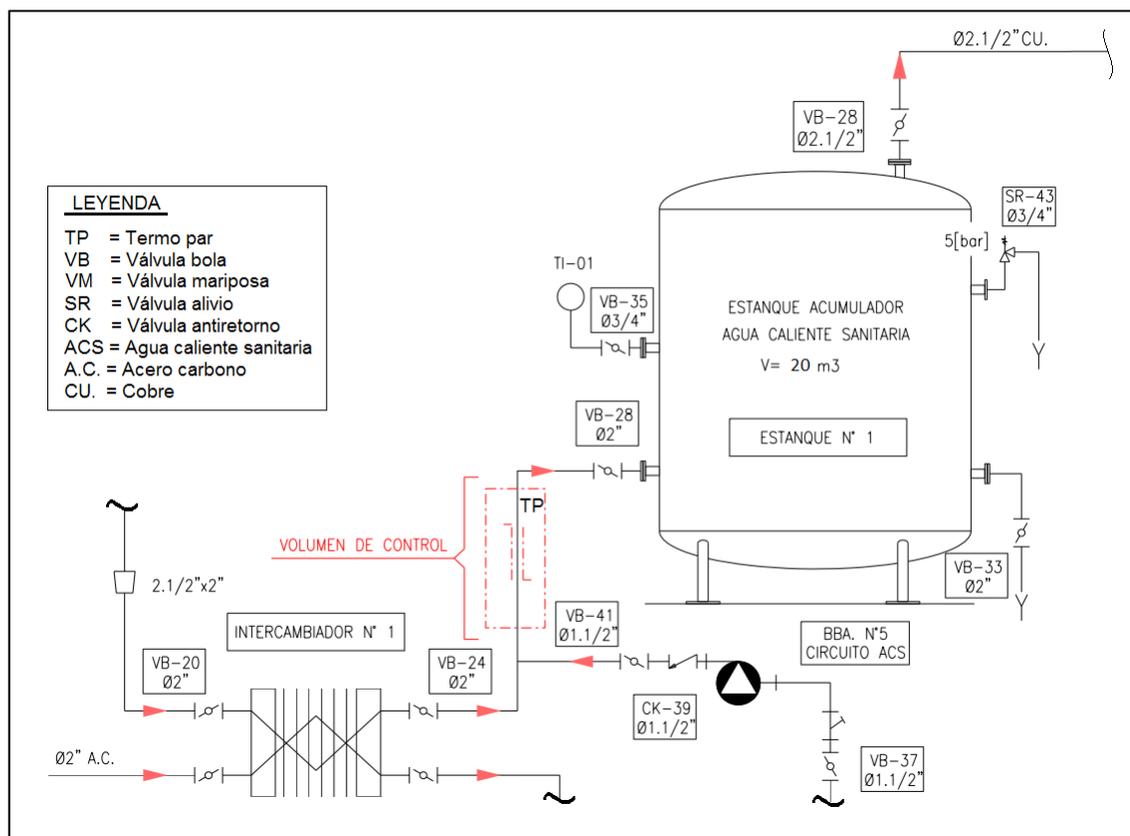


Fig. 4.5: Parte del diagrama de piping e instrumentación de sala de calderas edificio caso 3.  
Plano completo ver Anexo 6.

En la tabla 4.3 se describen los componentes instalados y sus características técnicas.

ITEM	EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD
1	REDUCCION COBRE 2 1/2" x 2"	1	c/u
2	TEE COBRE 2" x 1 1/2"	1	c/u
3	UNION AMERICANA HE 2" BRONCE	1	c/u
4	TERMINAL HE 2" BRONCE	2	c/u
5	CODO COBRE 2"	1	c/u
6	CAÑERÍA COBRE 2" TIPO K	2	[m]
7	TERMINAL HI 2 1/2" BRONCE	1	c/u
8	VALVULA BOLA 2"	1	c/u

Tabla 4.3: Componentes y sus características.



Fig. 4.6: Volumen de control.

#### 4.1 DEFINICIÓN METODOLOGÍA

A continuación, se realizará, para los tres casos, la medición de la temperatura de la superficie exterior de los tramos de cañerías correspondiente a los volúmenes de control.

Se desea calcular la variación de la resistencia a la incrustación  $R_f$  de los volúmenes de control durante un periodo de tiempo, para observar las curvas entregadas en un gráfico  $R_f$  v/s Tiempo (horas).

Las mediciones de las temperaturas de las superficies exteriores se realizan mientras fluye interiormente agua caliente, que viene desde un intercambiador de placas hasta un estanque acumulador. La temperatura del agua será controlada desde el termostato de las calderas, y se harán las pruebas estableciendo 3 temperaturas distintas para el agua, que serán 75°C, 85°C y 95°C.

En el siguiente cuadro se indica cómo se agrupan las mediciones para cada caso:

N° Caso	N° Prueba	Temperatura agua caliente [°C]	Periodo de tiempo [hr]
1	1	75	200
	2	85	200
	3	95	200
2	1	75	200
	2	85	200
	3	95	200
3	1	75	200
	2	85	200
	3	95	200

Tabla 4.1: Forma en que se agrupan las mediciones para cada caso.

En el esquema de la figura 4.7, que se muestra a continuación, se indica el tramo de cañerías por donde pasa el agua caliente, cuya temperatura se logra seteando el termostato de la caldera generadora.

Según esta configuración se tomará registro de la temperatura en la superficie exterior de la cañería. Como se indicó teóricamente esta temperatura es producto de la transferencia de energía desde el agua caliente que circula por la cañería hasta la superficie exterior por medio de los mecanismos de transferencia por convección, conducción y convección, nuevamente.

A medida que empieza a generarse las incrustaciones en la pared interior de la cañería, el valor de la temperatura superficial exterior, ira disminuyendo, esto debido a que la transferencia se dificulta cada vez más.

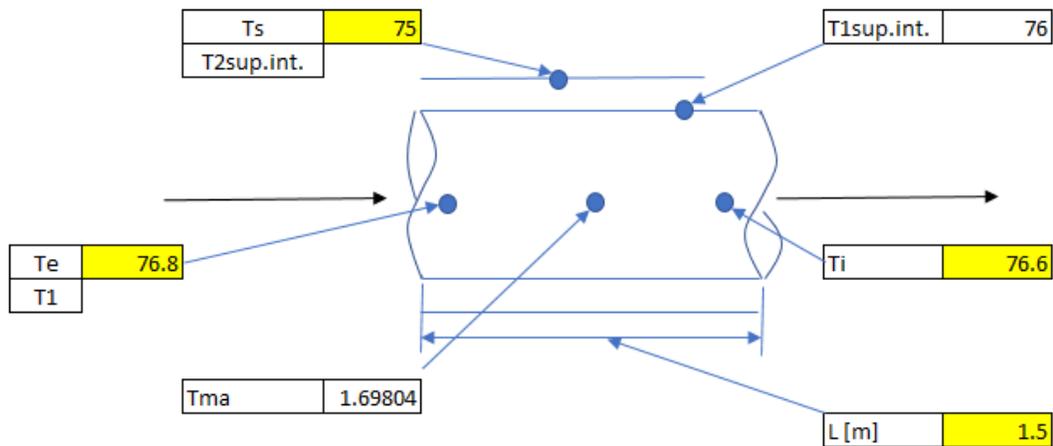


Fig. 4.2: Esquema de cañería de volumen de control.

$T_s$ : Temperatura superficie exterior cañería.

$T_e$ : Temperatura agua caliente de entrada a área de volumen de control.

$T_i$ : Temperatura agua caliente de salida de área volumen de control.

$T_{1\text{sup.int.}}$ : Temperatura superficie interior cañería.

$T_{2\text{sup.ext.}}$ : Temperatura superficie exterior cañería.

$T_{\text{ma}}$ : Temperatura media logarítmica.

Para el cálculo de la temperatura  $T_{1\text{sup.int.}}$ , se utilizó la expresión de transferencia de calor por conducción:

$$\dot{Q} = k A (T_{1\text{sup.int.}} - T_{2\text{sup.ext.}}) \quad [\text{KW}] \quad (\text{Ec.4.1})$$

$\dot{Q}$  = Corresponde a la potencia útil de las calderas para los casos 1, 2 y 3.

$k = 340 \text{ [W / m } ^\circ\text{C]}$ , Coeficiente de conductividad térmica del material de la cañería.

$T_{2\text{sup.ext.}}$  = Temperatura medida en terreno [ $^\circ\text{C}$ ].

Las temperaturas  $T_e$ ,  $T_i$  son medidas en terreno, utilizando una sonda tipo termopar.

La Fig. 4.8 muestra el instrumento de medición y registro de temperatura, modelo EasyLog 21CFR.

Este equipo, posee un rango de funcionamiento desde  $-40$  a  $125 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , muestreo desde rango de 1s hasta 12h, con la capacidad de guardar hasta 32.510 lecturas. Ver anexo 8, catálogo datalogger.



Fig. 4.3: Instrumento de medición termopar datalogger.

## CAPÍTULO V

### EXPOSICIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 5.1 EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos en las nueve pruebas realizadas en total, correspondiente a tres pruebas para cada caso analizado, como se indican en la tabla 4.4 del capítulo IV. Los resultados primarios obtenidos corresponden a la temperatura de la superficie de las cañerías, tomadas por el instrumento termopar datalogger cada 10 minutos, los cuales se agrupan en una tabla indicando las temperaturas cada una hora, obteniendo un total de 200 horas. Dicha tabla se presenta en anexo 7.

En una segunda etapa se procesan cada una de las temperaturas calculando los factores de incrustación  $R_f$ , para obtener distintas curvas  $R_f$  v/s Tiempo.

##### 5.1.1 Resultados caso 1

En la tabla 5.1 se indica para cada temperatura del fluido, las fechas y horas de inicio y termino de las pruebas.

CASO 1			
Temperatura	75°C	85°C	90°C
Fecha inicio	24/04/2017	08/05/2017	26/05/2017
Hora inicio	12:30	10:00	14:30
Fecha término	02/05/2017	16/05/2017	03/06/2017
Hora término	20:30	18:00	22:30

Tabla 5.1: Fechas de inicio y termino de las pruebas.

A continuación, se presentan las curvas  $R_f$  v/s tiempo, para el fluido a temperaturas de 75, 85 y 90 [°C].

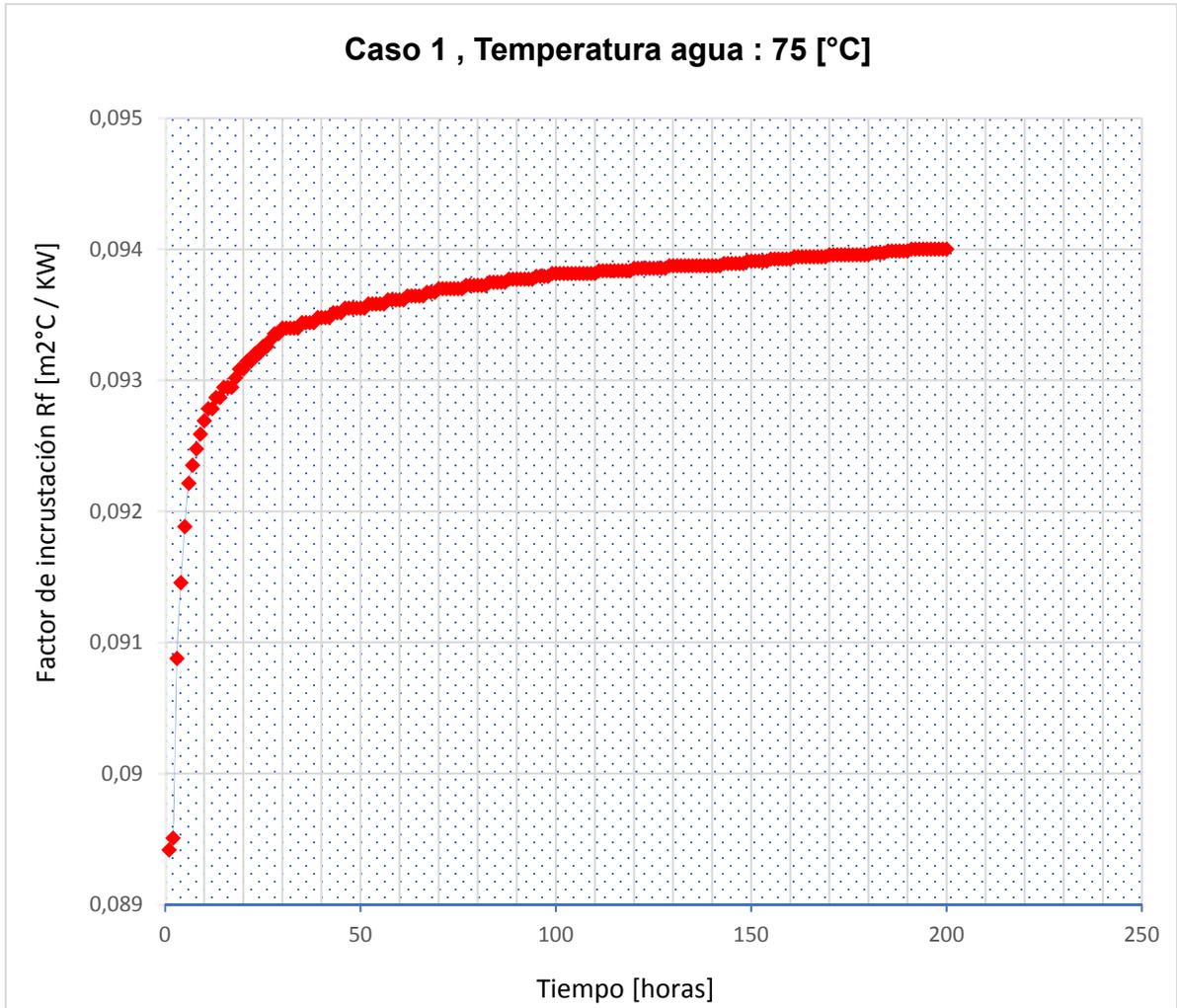


Fig. 5.1: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 75 [°C] caso 1.

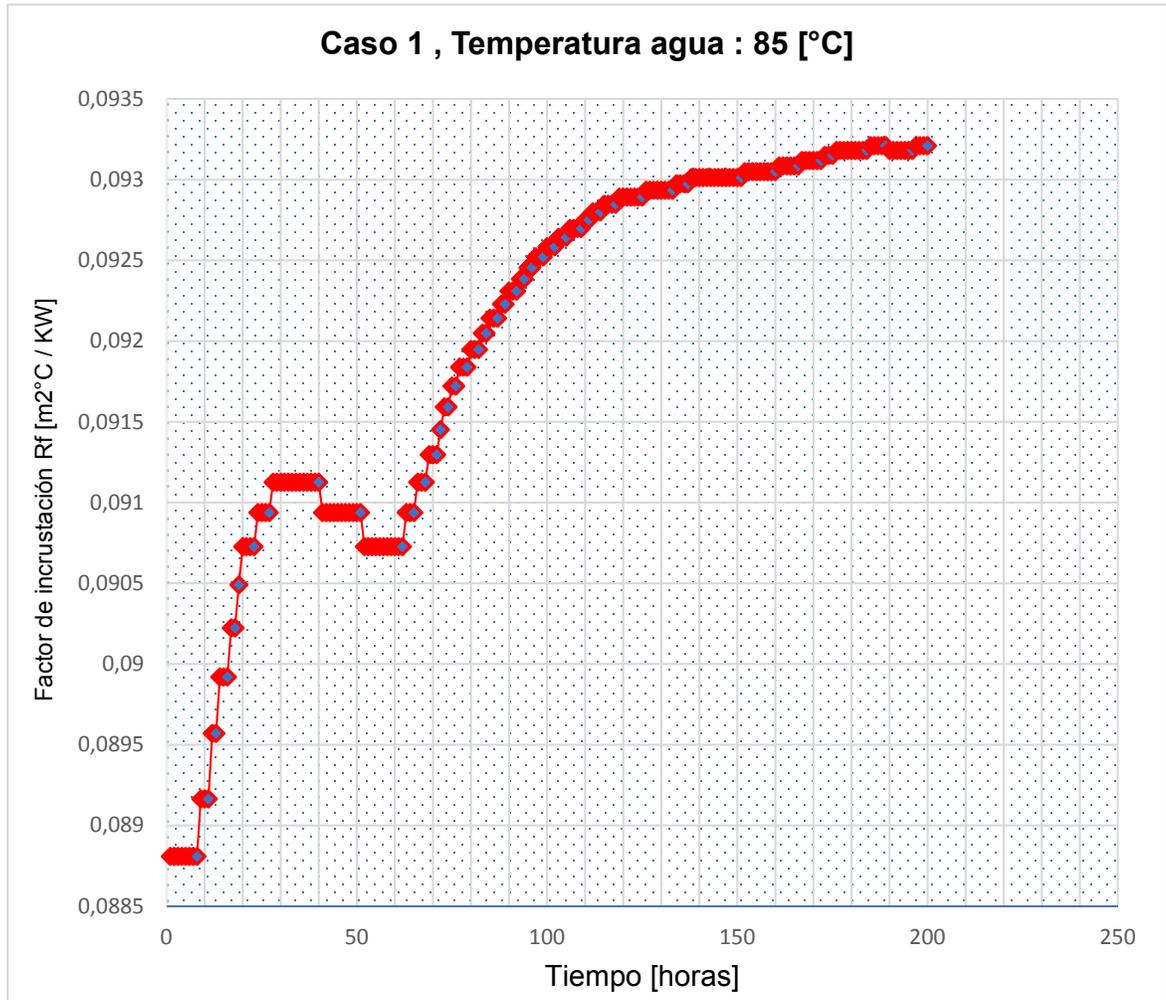


Fig. 5.2: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 85 [°C] caso 1.



### 5.1.2 Resultados caso 2

En la tabla 5.2 se indica para cada temperatura del fluido, las fechas y horas de inicio y termino de las pruebas.

CASO 2			
Temperatura	75°C	85°C	90°C
Fecha inicio	04/08/2017	16/08/2017	29/08/2017
Hora inicio	13:15	11:25	10:00
Fecha término	12/08/2017	24/08/2017	06/09/2017
Hora término	21:15	19:25	18:00

Tabla 5.2: Fechas de inicio y termino de las pruebas.

A continuación, se presentan las curvas Rf v/s tiempo, para el fluido a temperaturas de 75, 85 y 90 [°C].

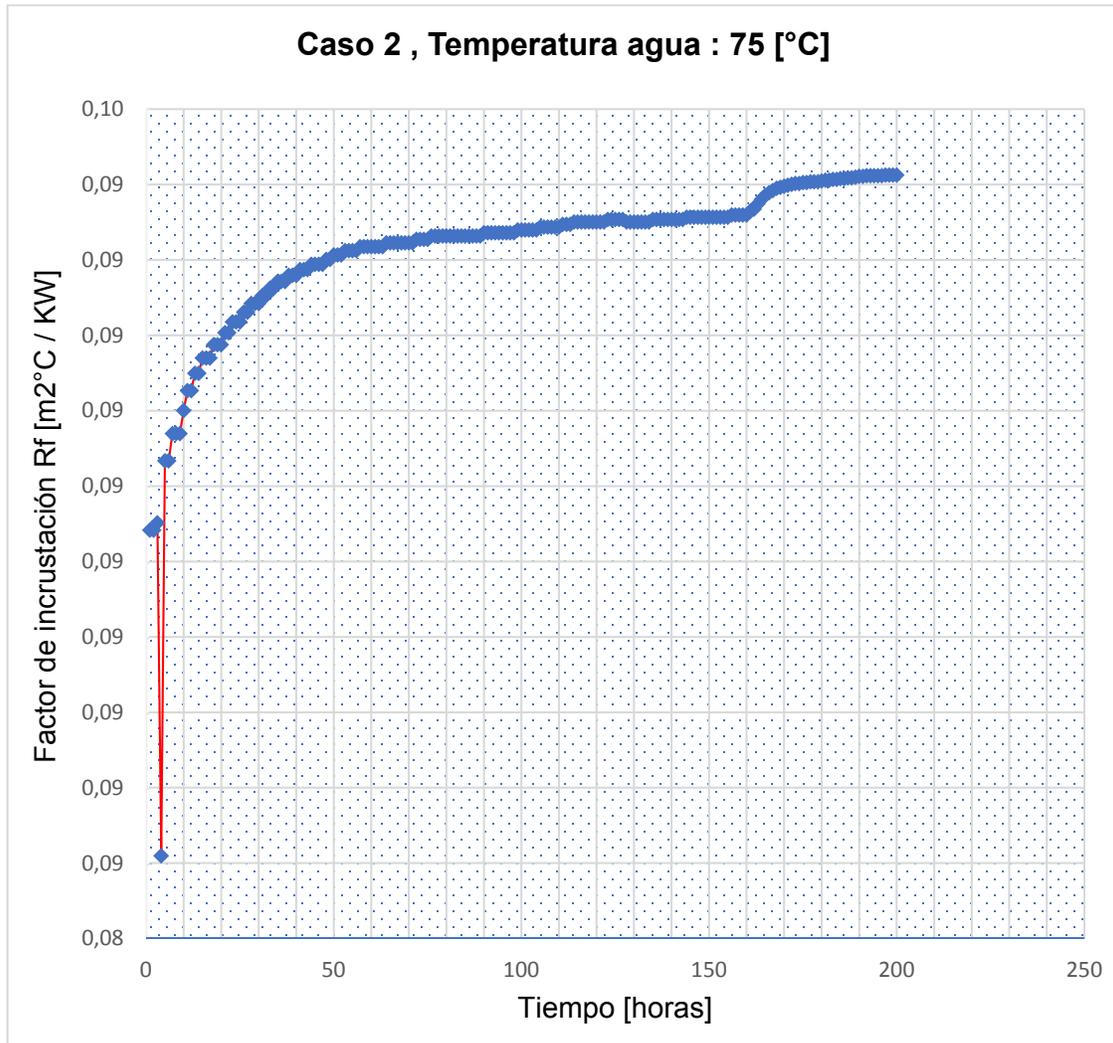


Fig. 5.4: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 75 [°C] caso 2.

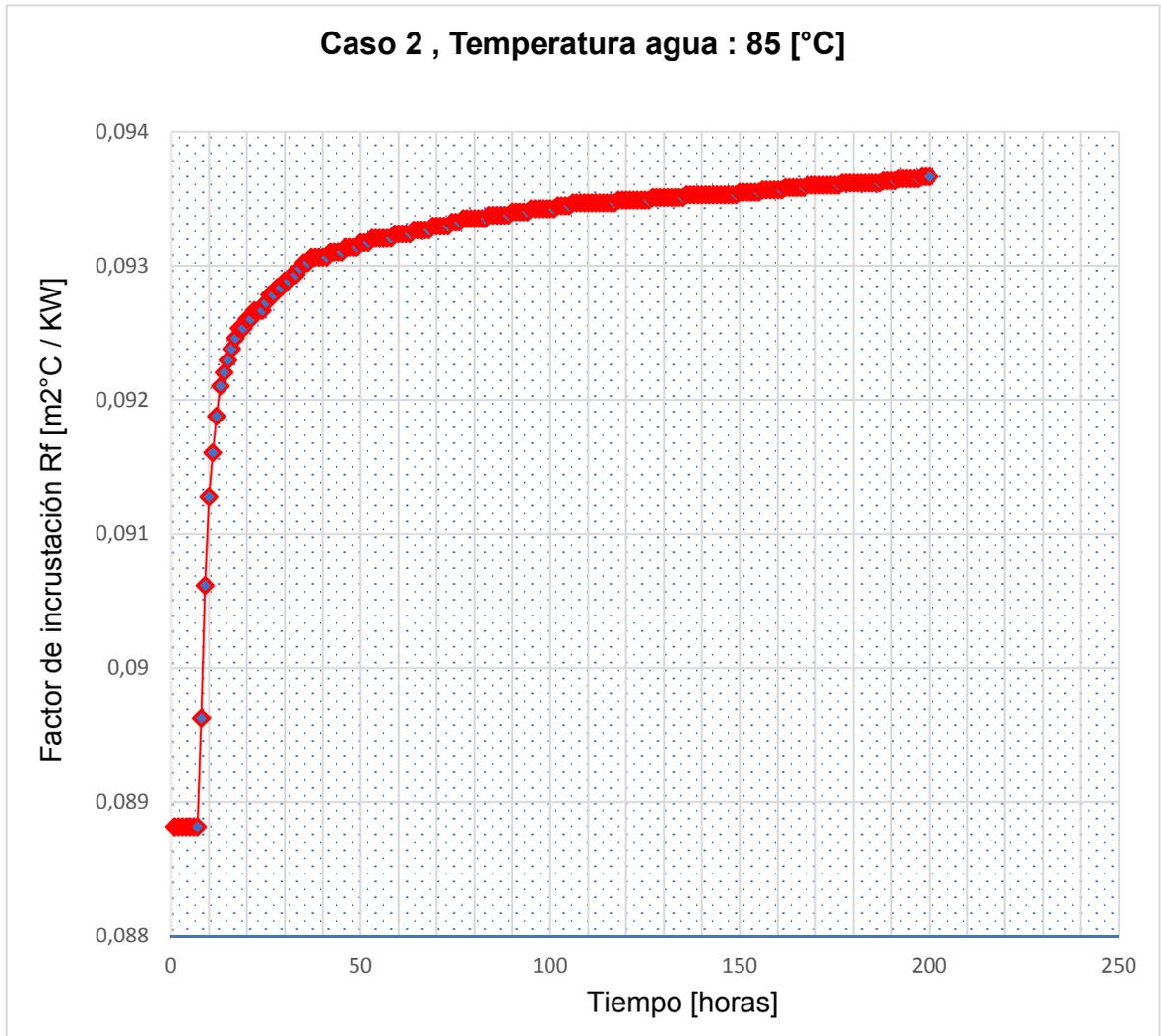


Fig. 5.5: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 85 [°C] caso 2.

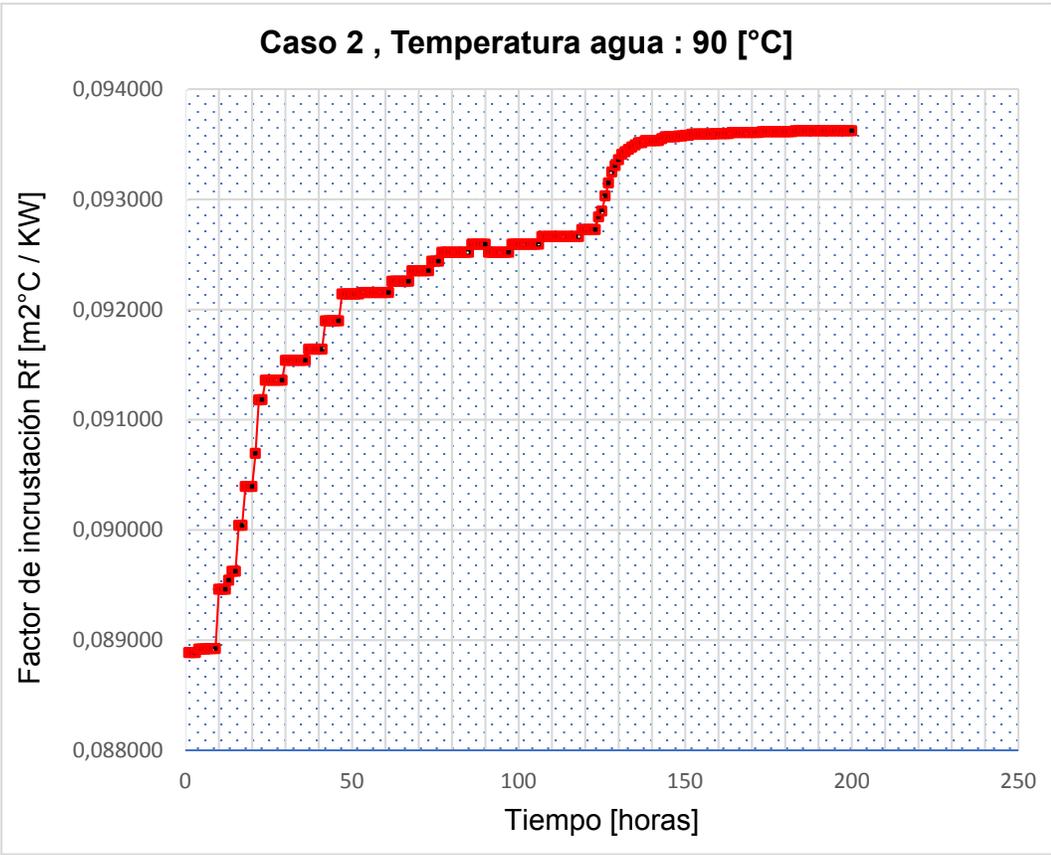


Fig. 5.6: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 90 [°C] caso 2.

### 5.1.3 Resultados caso 3

En la tabla 5.2 se indica para cada temperatura del fluido, las fechas y horas de inicio y termino de las pruebas.

CASO 3			
Temperatura	75°C	85°C	90°C
Fecha inicio	11/09/2017	11/10/2017	14/11/2017
Hora inicio	12:00	10:00	15:30
Fecha término	19/09/2017	19/10/2017	22/11/2017
Hora término	20:00	18:00	23:30

Tabla 5.3: Fechas de inicio y término de las pruebas.

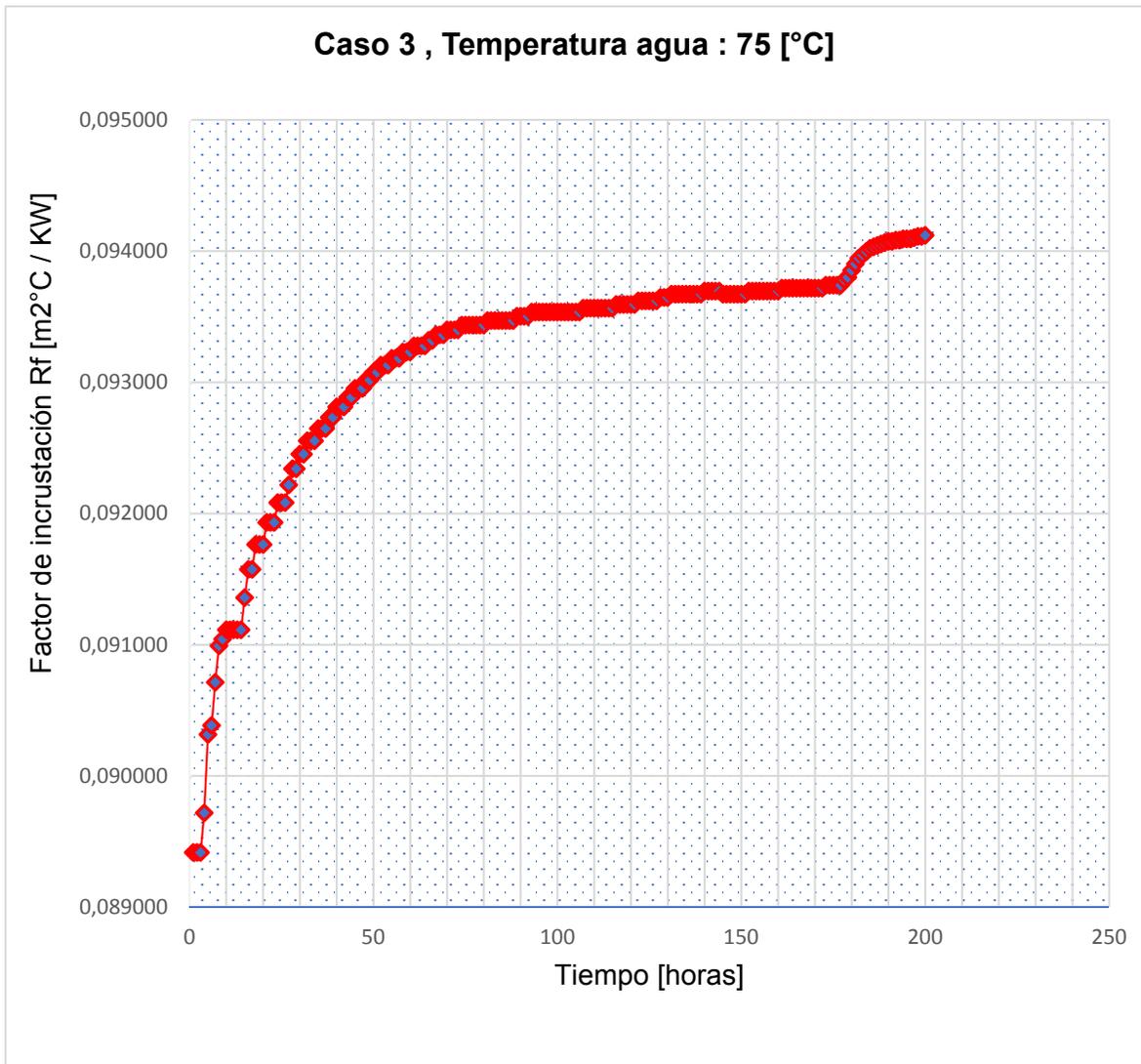


Fig. 5.7: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 75 [°C] caso 3.

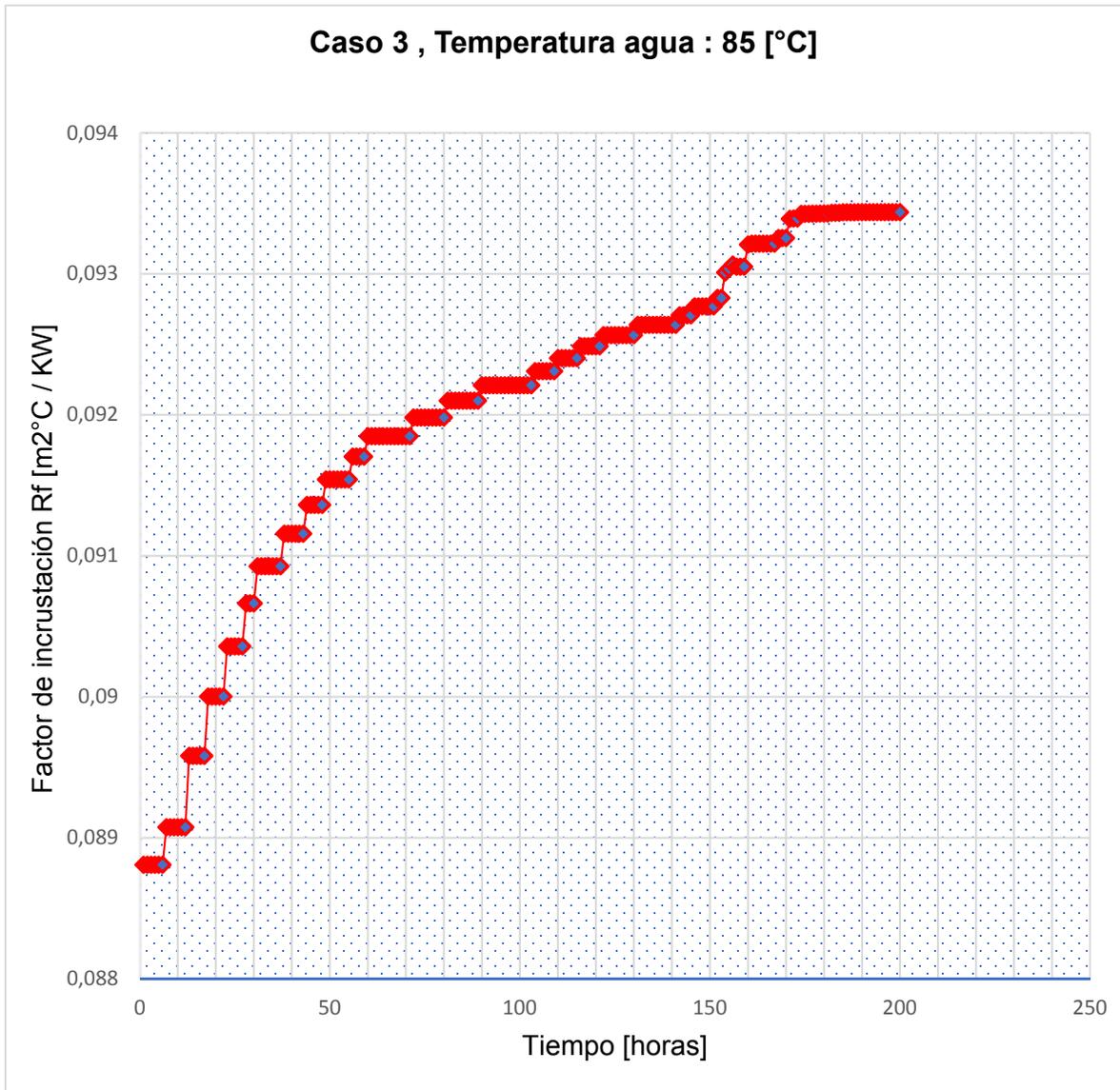


Fig. 5.8: Curva  $R_f$  v/s Tiempo para temperatura 85 [°C] caso 3.

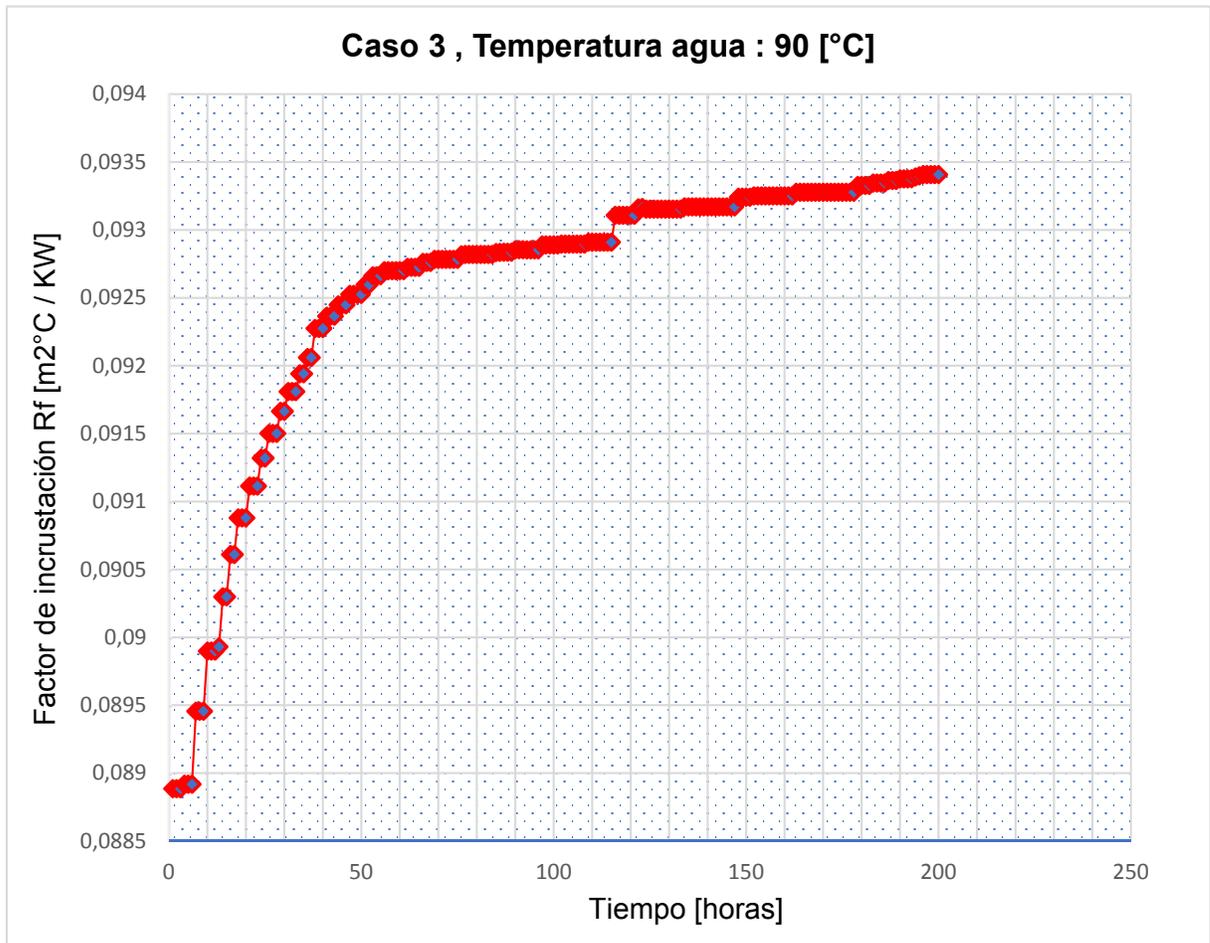


Fig. 5.9: Curva Rf v/s Tiempo para temperatura 90 [°C] caso 3.

## 5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 5.4 se muestran los valores de la resistencia a la incrustación obtenidos en la medición doscientos. También el promedio de la resistencia a la incrustación en las doscientas horas. La tabla 5.5 muestra la diferencia entre  $R_f$  para temperatura 85 y 75 [°C] y la diferencia entre  $R_f$  para temperatura 90 y 85 [°C].

	T [°C]	$R_f$ (t=200 [hr]) [m <sup>2</sup> °C/KW]	$\bar{X} R_f$ [m <sup>2</sup> °C/KW]
CASO 1	75	0.09400186	0.093614
	85	0.093210162	0.091997
	90	0.093094843	0.092537
CASO 2	75	0.094125588	0.093135
	85	0.09366391	0.093126
	90	0.093620832	0.092452
CASO 3	75	0.094120299	0.093184
	85	0.093436716	0.092007
	90	0.093408139	0.092566

Tabla 5.4: Valores de  $R_f$  en t = 200.

	$\Delta$ (85 [°C] - 75 [°C])	$\Delta$ (90 [°C] - 85 [°C])
CASO 1	-0.00079170	-0.000115319
CASO 2	-0.000461678	-4.30779E-05
CASO 3	-0.000683582	-2.85775E-05

Tabla 5.5:  $\Delta$  Resistencias a las incrustaciones.

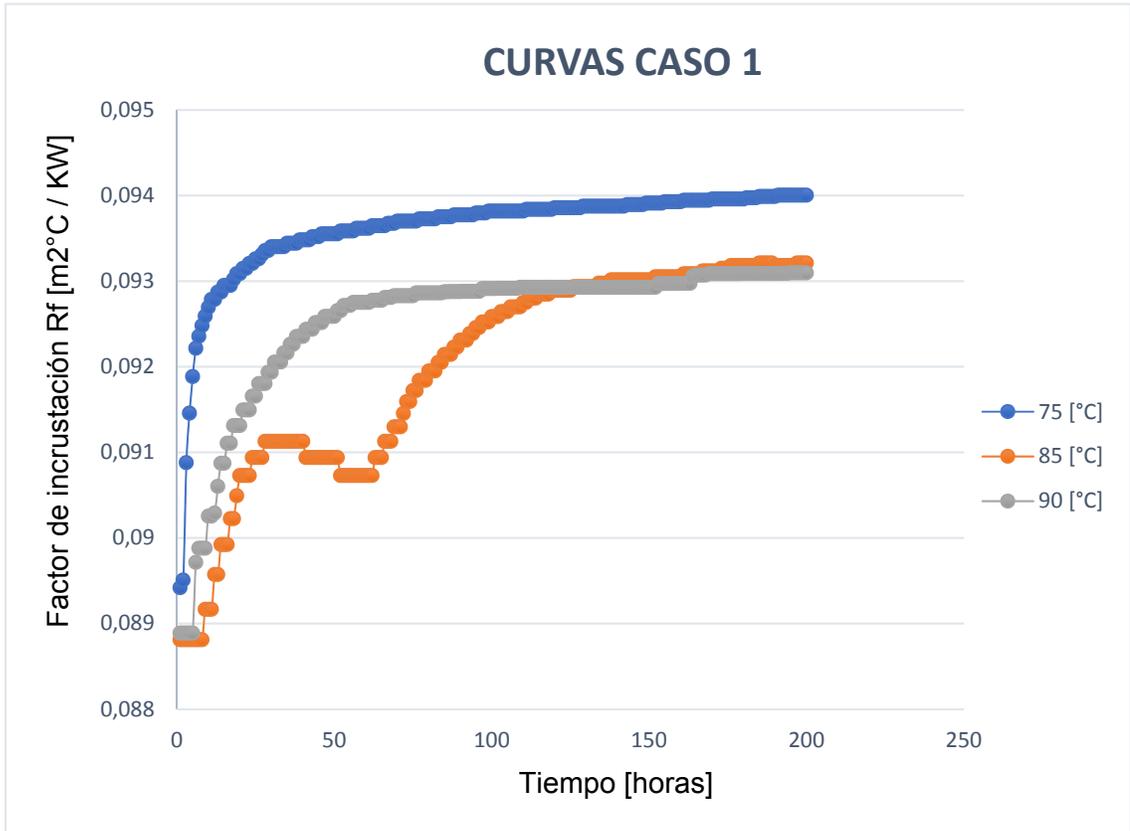


Fig. 5.10: Curvas Rf v/s Tiempo para temperaturas 75, 85 y 90 [°C] caso 1.

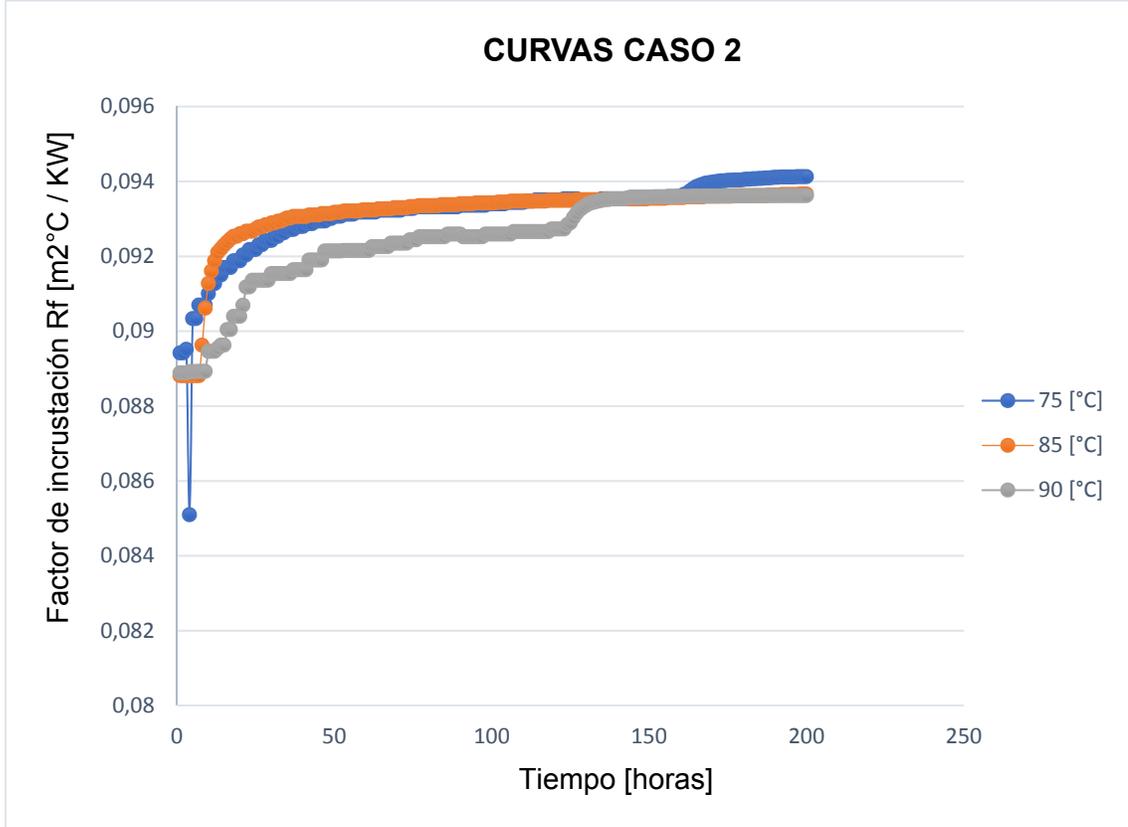


Fig. 5.11: Curvas Rf v/s Tiempo para temperaturas 75, 85 y 90 [°C] caso 2.

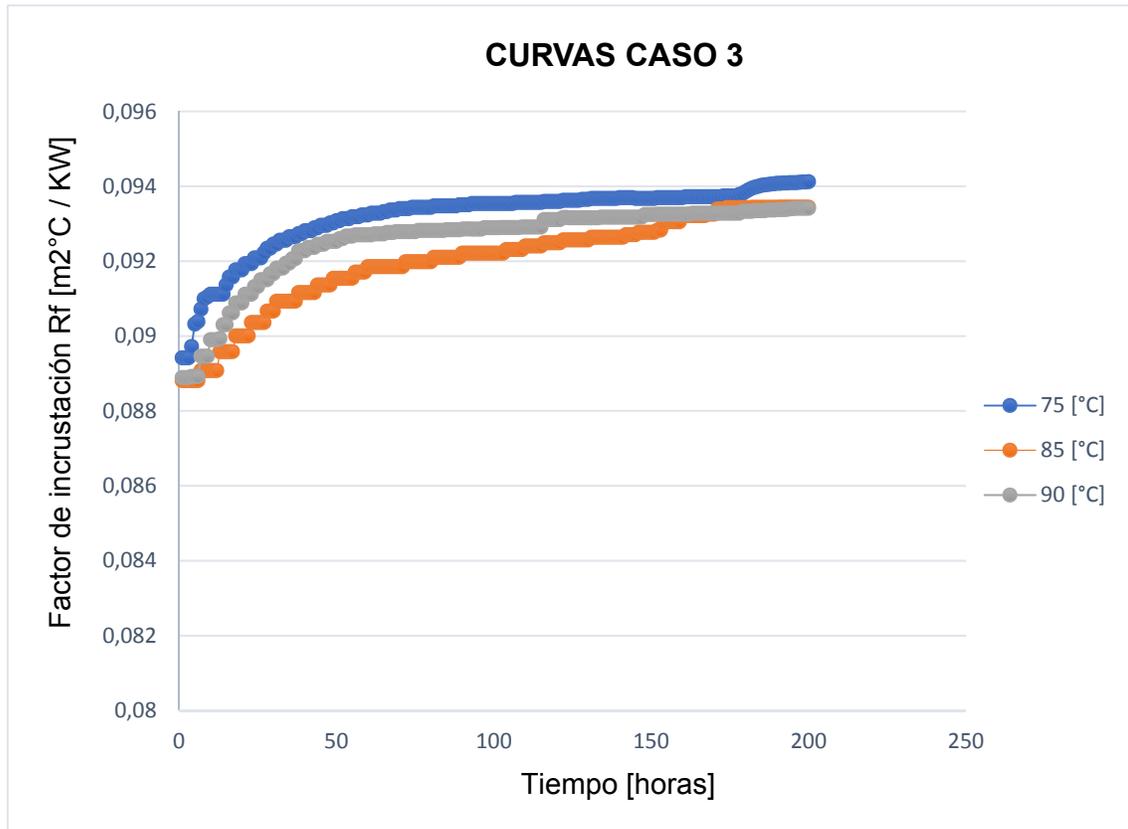


Fig. 5.12: Curvas Rf v/s Tiempo para temperaturas 75, 85 y 90 [°C] caso 3.

Las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12, demuestran que la resistencia a la incrustación es menor a mayor temperatura de trabajo del sistema.

La tabla 5.4 de muestra que, para los tres casos, la resistencia a la incrustación es menor siempre a mayor temperatura de trabajo (90 [°C]) al cumplirse las 200 [hr] de medición.

Las distintas mediciones se registraron hasta las 200 [hr], ya que después de ese período todas las curvas muestran un comportamiento constante, es decir, no muestran cambios significativos del valor de Rf.

En tabla 5.4, también se indican los valores promedios para cada temperatura de cada caso. Para los tres casos, el valor promedio de Rf que es mayor corresponde a la temperatura de 90 [°C].

La Tabla 5.5 indica que los valores de Rf menores se logran a la temperatura de trabajo de 90 [°C], en la medición tomada a las 200 [hr], y el valor mayor de Rf se logra con la temperatura de trabajo de 75 [°C].

Las curvas también permiten observar el comportamiento de las formaciones incrustaciones en distintos intervalos de tiempo.

La curva de la figura 5.1 (curva Rf v/s tiempo para temperatura 75 [°C] caso1), indica un aumento progresivo de Rf dentro de las primeras 10 [hr] de 0-0,092 [m<sup>2</sup> \* °C /KW]. En las siguientes horas, Rf sigue aumentando rápidamente hasta las 150 [hr], después el aumento es más lento hasta las 200 [hr].

La curva de la figura 5.2 (curva Rf v/s tiempo para temperatura 85 [°C] caso1), indica el aumento de Rf 0,0912 [m<sup>2</sup> \* °C /KW] hasta las primeras 30 [hr], luego la velocidad tiene un descenso hasta Rf 0,0907 [m<sup>2</sup> \* °C /KW] hasta tiempo = 60 [hr], donde empieza un aumento de RF hasta tiempo = 120 [hr] en el cual empieza a ser más lento el crecimiento llegando a un valor estable de Rf = 0,0933 [m<sup>2</sup> \* °C /KW].

La curva de la figura 5.3 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 90 [°C] caso1), tiene un comportamiento similar al de la curva de la figura 5.1, pero logrando una estabilidad de  $R_f$  en tiempo = 165 [hr]. También se une a esta descripción las curvas de las figuras 5.4 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 75 [°C] caso2) y 5.5 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 85 [°C] caso2). Es importante indicar, para la figura 5.4, en tiempo = 5 [hr] se produce una disminución brusca del valor de  $R_f$ , debido a que se detecta que la sonda termopar se ha movido de su posición inicial en la cañería. La sonda se reubica en dicha posición.

La curva figura 5.6 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 90 [°C] caso2), muestra un crecimiento escalonado de  $R_f$  hasta tiempo = 120 [hr]. Luego aumenta a una tasa de crecimiento mayor hasta tiempo = 140 [hr], finalmente, presenta un crecimiento con tendencia a establecerse hasta tiempo = 200 [hr].

La curva de la figura 5.7 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 75 [°C] caso3), tiene un comportamiento similar a la curva de la figura 5.1, en tiempo = 170 [hr] se marca un aumento en  $R_f$ , estabilizándose en 0,094 [ $m^2 \cdot ^\circ C / KW$ ] a partir de tiempo = 180 [hr].

Las curvas de las figuras 5.8 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 85 [°C] caso3) y 5.9 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 90 [°C] caso3), tienen un comportamiento del aumento de  $R_f$  de forma escalonada similar a la curva de la figura 5.6 (curva  $R_f$  v/s tiempo para temperatura 90 [°C] caso2).

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES**

Las incrustaciones en las cañerías están siempre presentes, pero se demuestra que este efecto se puede minimizar aumentando la temperatura de trabajo del sistema.

Este fenómeno indica que las incrustaciones calcáreas presentes en las tres salas de calderas son del tipo de sales de solubilidad inversa, que según la definición en el capítulo II, sección 2.3, estas exceden su límite de solubilidad al aumentar la temperatura. En el caso del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ , su solubilidad es inversa. La teoría nos indica que una solución no saturada de carbonato de calcio se calienta hasta alcanzar el punto límite de solubilidad hasta una determinada temperatura, luego, al seguir aumentando la temperatura, la solución pasa a un estado de sobresaturación donde ocurre la formación de las incrustaciones en las paredes de la cañería. Si se continúa con el aumento de temperatura, la concentración alcanza un punto de equilibrio, esto se manifiesta en las curvas Rf v/s tiempo.

La razón de las formaciones de incrustaciones calcáreas se debe a los minerales presentes en el agua de alimentación que se utiliza en las salas de calderas. Si bien se entiende que la solución a este problema en primera instancia es la de tratar el agua mediante la instalación de un sistema de filtración y dosificación, generalmente adhiriendo productos al agua como polifosfatos complejos con una u otra formulación según se trate evitar corrosiones o incrustaciones calcáreas. Para este estudio las instalaciones de centrales térmicas se encuentran en comunidades habitacionales, como se sabe, estas comunidades solventan los gastos de producción de agua caliente sanitaria y mantenimiento de los equipos mediante la recolección de gastos comunes. Este factor económico hace que las comunidades de edificios no consideren, actualmente, como opción el tratamiento de las aguas. La experiencia de las empresas que ofrecen servicios de mantenimiento de salas de calderas, indica que las comunidades, en su mayoría, se inclinan a la opción de un mantenimiento correctivo, más que preventivo.

Analizando el historial de trabajos correctivos en los casos que involucran este estudio, durante los tres últimos años (2015, 2016, 2017) podemos ver el número de veces que es necesario realizar el lavado mecánico químico de los intercambiadores de placas para los casos 1 y 3. Y el número de veces que se reemplazan bombas de recirculación y otros componentes para el caso 2.

	2015		2016		2017	
	LIMPIEZA DE INTERCAMBIADORES	CAMBIO BOMBAS Y COMPONENTES	LIMPIEZA DE INTERCAMBIADORES	CAMBIO BOMBAS Y COMPONENTES	LIMPIEZA DE INTERCAMBIADORES	CAMBIO BOMBAS Y COMPONENTES
CASO 1	3 veces	1	2 veces	-	2 veces	1
CASO 2	-	4	-	2	-	1
CASO 3	2 veces	2	2 veces	-	2 veces	2

Tabla 6.1: Trabajos realizados en salas de calderas entre 2015 y 2017.

De la tabla 6.1 se puede concluir lo siguiente para cada caso:

En la sala de calderas del caso 1, entre los años 2015, 2016 y 2017 se realizaron 7 lavados de los dos intercambiadores de calor tipo placa, con que cuenta dicha sala. Si no se cuenta con el primer lavado que se realiza a principio del 2015, se establece que los intercambiadores se deben lavar 2 veces al año. También es válido afirmar que el lavado tiene una vida útil de seis meses.

Para la sala de calderas del caso 2, los trabajos efectivamente consisten en realizar 2 lavados de intercambiadores al año. En el año 2017 se registran el cambio de 2 bombas de recirculación y 3 válvulas de bola.

La sala de calderas del caso 3 no cuenta con intercambiadores de calor, por los que los efectos de las incrustaciones calcáreas recaen en bombas de recirculación, válvulas y cañería.

En conclusión, las comunidades gastan un alto porcentaje del presupuesto destinado a salas de calderas en el cambio de elementos y limpiezas de equipos, debido a esto es complicado que se tomen decisiones pensando en invertir para la prevención de incrustaciones.

También según los registros de ficha de mantenimiento de las salas de calderas, muchas comunidades toman la decisión de bajar las temperaturas de trabajo de las calderas en las estaciones de primavera-verano, pensando en obtener un ahorro en combustible.

Este estudio pretende aportar información técnica para lograr reducir los efectos de las incrustaciones calcáreas, mediante el control de las temperaturas de trabajo del sistema.

La información técnica a la que se hace referencia, es resultado del análisis termodinámico junto con los datos obtenidos in situ.

Es necesario indicar que el análisis de la formación de incrustaciones en este estudio está acotado a los volúmenes de control seleccionados. Las formaciones en otros componentes del circuito de generación de agua caliente sanitaria pueden estar menos avanzadas o más avanzadas dentro del mismo periodo de tiempo.

Este estudio da las condiciones de trabajos en volúmenes de control, sirve como base para futuras metodologías de control y prevención o disminución del fenómeno de incrustaciones calcáreas.

Finalmente se considera que los datos, resultados y conclusiones obtenidos en este estudio son un aporte a los trabajos desarrollados hasta este momento en el ámbito de incrustaciones calcáreas en salas de calderas. Es una fuente de información valiosa para futuros estudios que busquen desarrollar otros aspectos de esta industria. Este estudio no descarta la alternativa del tratamiento del agua potable antes de entrar en el proceso de generación de agua caliente, y propone seguir desarrollando métodos

de control de incrustaciones para salas de calderas que se encuentren dentro de comunidad de edificios.

## NOMENCLATURA GENERAL

### Abreviaciones

$\Delta T_{prom}$	=	Diferencia de temperatura media logarítmica.
A.C.	=	Acero carbono.
$A_c$	=	Área sección transversal.
ACS	=	Agua caliente sanitaria.
$A_{sup}$	=	Área superficie.
C.u.	=	Cobre.
CERUG	=	Organismo de dirección de investigación de Gaz de France.
CK	=	Válvula check.
$C_p$	=	Calor específico.
D	=	Diámetro.
$D_{ext}$	=	Diámetro exterior.
$D_{int}$	=	Diámetro interior.
$dt/dx$	=	Gradiente de la curva de temperatura en función de la distancia.
DVGW	=	German gas and water Co-operation.
E	=	Energía.
$E_{ent}$	=	Energía de entrada.

$E_{sal}$	=	Energía de salida.
$E_{sist}$	=	Energía del sistema.
$h$	=	Coefficiente transferencia de calor por convección.
IAPMO	=	International association of plumbing and mechanical officials.
$k$	=	Conductividad térmica de un material.
$K_{sp}$	=	Constante del producto de solubilidad.
$m$	=	Masa.
$\dot{m}$	=	Flujo másico.
P&ID	=	Piping's and instrumental diagram.
PH	=	Medida de la acidez a basicidad (alcalinidad) de un material.
PWT	=	Physical water treatment.
$Q$	=	Cantidad de transferencia de calor.
$\dot{Q}_{conducción}$	=	Velocidad de transferencia de calor desde o hacia un fluido por conducción.
$\dot{Q}_{convección}$	=	Velocidad de transferencia de calor desde o hacia un fluido por convección.
$\dot{q}$	=	Flujo de calor.
$R_{cond.}$	=	Resistencia a la conducción.
$R_{conv.}$	=	Resistencia a la convección.

$R_f$	=	Resistencia a la transferencia de calor.
$S$	=	Solubilidad.
$SR$	=	Válvula de alivio.
$T$	=	Temperatura.
$T_e$	=	Temperatura de entrada.
$T_{ext.}$	=	Temperatura exterior.
$T_{int.}$	=	Temperatura interior.
$T_{sup. int.}$	=	Temperatura superficie interior.
$TP$	=	Termo par.
$T_s$	=	Temperatura de salida.
$U$	=	Coeficiente global de transferencia de calor.
$U_c$	=	Coeficiente global de transferencia de calor sin incrustación.
$U_f$	=	Coeficiente global de transferencia de calor con incrustación.
$VB$	=	Válvula de bola.
$VM$	=	Válvula de mariposa.
$\pi$	=	Pi.
$\rho$	=	Densidad de un fluido.
$v$	=	Velocidad promedio.

## **Unidades**

[°H o °F] = Grados hidráulicos o grados franceses.

[°C] = Grados Celsius.

[cm] = centímetros.

[m] = metros.

[mm] = milímetros.

[mg] = miligramos.

[l] = litros.

[W] = Kilo Watts.

[Kg] = Kilo gramos.

[s] = segundos.

[hr] = horas.

## **Bibliografía**

- [1] Contento Velásquez D.: Modelación de la formación de depósitos en un condensador tipo superficie.
  
- [2] Kukulka, D. : Devgun, M. : Fluid temperatura and velocity effect on fouling. En : Applied Thermal Engineering 27 (2007).
  
- [3] Crabtree, M.; Eslinger, D.; Fletcher, P.; Miller, M.; Johnson, A.; King, G. : La lucha contra las incrustaciones – Remoción y prevención. Oilfield Review.
  
- [4] Pancarbo, F.: Corrosión y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación” Edit. Alfaomega 2013.
  
- [5] Yunus A. Cengel: Transferencia de calor y masa.

## ANEXO 1

Carbonato de calcio	$\text{CaCO}_3$
Sulfato de calcio	$\text{CaSO}_4$
Silicato de magnesio	$3\text{MgO SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Hidróxido de magnesio	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Hidróxido de calcio	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Óxido ferroso	$\text{FeO}$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$

Incrustaciones comúnmente encontradas en sistemas de generación de vapor.

Fuente: Pancarbo, F.: Corrosión y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación”.

## ANEXO 2

### Tabla A-9

#### Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P <sub>sat</sub> , kPa	Densidad, ρ kg/m <sup>3</sup>		Entalpía de vaporización, h <sub>fg</sub> , kJ/kg	Calor específico, c <sub>p</sub> , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 <sup>-3</sup>	0.922 × 10 <sup>-5</sup>	13.5	1.00	-0.068 × 10 <sup>-3</sup>
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 × 10 <sup>-5</sup>	11.2	1.00	0.015 × 10 <sup>-3</sup>
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 <sup>-3</sup>	0.946 × 10 <sup>-5</sup>	9.45	1.00	0.733 × 10 <sup>-3</sup>
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 <sup>-3</sup>	0.959 × 10 <sup>-5</sup>	8.09	1.00	0.138 × 10 <sup>-3</sup>
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 <sup>-3</sup>	0.973 × 10 <sup>-5</sup>	7.01	1.00	0.195 × 10 <sup>-3</sup>
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 <sup>-3</sup>	0.987 × 10 <sup>-5</sup>	6.14	1.00	0.247 × 10 <sup>-3</sup>
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	1.001 × 10 <sup>-5</sup>	5.42	1.00	0.294 × 10 <sup>-3</sup>
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 <sup>-3</sup>	1.016 × 10 <sup>-5</sup>	4.83	1.00	0.337 × 10 <sup>-3</sup>
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-5</sup>	4.32	1.00	0.377 × 10 <sup>-3</sup>
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 <sup>-3</sup>	1.046 × 10 <sup>-5</sup>	3.91	1.00	0.415 × 10 <sup>-3</sup>
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 <sup>-3</sup>	1.062 × 10 <sup>-5</sup>	3.55	1.00	0.451 × 10 <sup>-3</sup>
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 <sup>-3</sup>	1.077 × 10 <sup>-5</sup>	3.25	1.00	0.484 × 10 <sup>-3</sup>
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 <sup>-3</sup>	1.093 × 10 <sup>-5</sup>	2.99	1.00	0.517 × 10 <sup>-3</sup>
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 <sup>-3</sup>	1.110 × 10 <sup>-5</sup>	2.75	1.00	0.548 × 10 <sup>-3</sup>
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 <sup>-3</sup>	1.126 × 10 <sup>-5</sup>	2.55	1.00	0.578 × 10 <sup>-3</sup>
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 <sup>-3</sup>	1.142 × 10 <sup>-5</sup>	2.38	1.00	0.607 × 10 <sup>-3</sup>
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 <sup>-3</sup>	1.159 × 10 <sup>-5</sup>	2.22	1.00	0.653 × 10 <sup>-3</sup>
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.176 × 10 <sup>-5</sup>	2.08	1.00	0.670 × 10 <sup>-3</sup>
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 <sup>-3</sup>	1.193 × 10 <sup>-5</sup>	1.96	1.00	0.702 × 10 <sup>-3</sup>
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 <sup>-3</sup>	1.210 × 10 <sup>-5</sup>	1.85	1.00	0.716 × 10 <sup>-3</sup>
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 <sup>-3</sup>	1.227 × 10 <sup>-5</sup>	1.75	1.00	0.750 × 10 <sup>-3</sup>
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.261 × 10 <sup>-5</sup>	1.58	1.00	0.798 × 10 <sup>-3</sup>
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 <sup>-3</sup>	1.296 × 10 <sup>-5</sup>	1.44	1.00	0.858 × 10 <sup>-3</sup>
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 <sup>-3</sup>	1.330 × 10 <sup>-5</sup>	1.33	1.01	0.913 × 10 <sup>-3</sup>
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 <sup>-3</sup>	1.365 × 10 <sup>-5</sup>	1.24	1.02	0.970 × 10 <sup>-3</sup>
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 <sup>-3</sup>	1.399 × 10 <sup>-5</sup>	1.16	1.02	1.025 × 10 <sup>-3</sup>
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 <sup>-3</sup>	1.434 × 10 <sup>-5</sup>	1.09	1.05	1.145 × 10 <sup>-3</sup>
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 <sup>-3</sup>	1.468 × 10 <sup>-5</sup>	1.03	1.05	1.178 × 10 <sup>-3</sup>
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 <sup>-3</sup>	1.502 × 10 <sup>-5</sup>	0.983	1.07	1.210 × 10 <sup>-3</sup>
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-5</sup>	0.947	1.09	1.280 × 10 <sup>-3</sup>
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.571 × 10 <sup>-5</sup>	0.910	1.11	1.350 × 10 <sup>-3</sup>
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 <sup>-3</sup>	1.641 × 10 <sup>-5</sup>	0.865	1.15	1.520 × 10 <sup>-3</sup>
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 <sup>-3</sup>	1.712 × 10 <sup>-5</sup>	0.836	1.24	1.720 × 10 <sup>-3</sup>
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 <sup>-3</sup>	1.788 × 10 <sup>-5</sup>	0.832	1.35	2.000 × 10 <sup>-3</sup>
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 <sup>-3</sup>	1.870 × 10 <sup>-5</sup>	0.854	1.49	2.380 × 10 <sup>-3</sup>
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 <sup>-3</sup>	1.965 × 10 <sup>-5</sup>	0.902	1.69	2.950 × 10 <sup>-3</sup>
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 <sup>-3</sup>	2.084 × 10 <sup>-5</sup>	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 <sup>-3</sup>	2.255 × 10 <sup>-5</sup>	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 <sup>-3</sup>	2.571 × 10 <sup>-5</sup>	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 <sup>-3</sup>	4.313 × 10 <sup>-5</sup>	—	—	—

**Nota 1:** La viscosidad cinemática  $\nu$  y la difusividad térmica  $\alpha$  se pueden calcular a partir de sus definiciones,  $\nu = \mu/\rho$  y  $\alpha = k/\rho c_p = w/Pr$ . Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

**Nota 2:** La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

**Fuente:** Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), págs. 291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

Fuente: Yunus A. Cengel: Transferencia de calor y masa.

### ANEXO 3

Tabla 1-5

Tipo de convección	$h, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Convección libre de gases	2–25
Convección libre de líquidos	10–1 000
Convección forzada de gases	25–250
Convección forzada de líquidos	50–20 000
Ebullición y condensación	2 500–100 000

\*Multiplíquese por 0.176 para convertir a  $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ .

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Fuente: Yunus A. Cengel: Transferencia de calor y masa.

## **ANEXO 4**

Diagrama de cañerías e instrumentación para caso 1

## **ANEXO 5**

Diagrama de cañerías e instrumentación para caso 2

## **ANEXO 6**

Diagrama de cañerías e instrumentación para caso 3

## ANEXO 7

Tabla temperatura v/s tiempo

	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
Temperatura del fluido =	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
Tiempo [hr]									
1	75	85	90	75	85	90	75	85	90
2	74.970	85.000	90.000	75.000	85.000	90.000	75.000	85.000	90.000
3	74.340	85.000	90.000	74.968	85.000	90.000	75.000	85.000	90.000
4	73.920	85.000	90.000	75.786	85.000	89.988	74.895	85.000	89.988
5	73.500	85.000	90.000	74.636	85.000	89.988	74.645	85.000	89.988
6	73.080	85.000	89.636	74.636	85.000	89.988	74.612	85.000	89.988
7	72.870	85.000	89.547	74.448	85.000	89.986	74.438	84.882	89.762
8	72.660	85.000	89.547	74.448	84.600	89.986	74.268	84.882	89.762
9	72.450	84.840	89.547	74.448	83.895	89.986	74.234	84.882	89.762
10	72.240	84.840	89.322	74.260	83.190	89.759	74.185	84.882	89.536
11	72.030	84.840	89.322	74.072	82.720	89.759	74.185	84.882	89.536
12	72.030	84.630	89.298	74.072	82.250	89.759	74.185	84.882	89.536
13	71.820	84.630	89.073	73.884	81.780	89.721	74.185	84.624	89.518
14	71.820	84.420	88.847	73.884	81.545	89.681	74.185	84.624	89.291
15	71.610	84.420	88.847	73.696	81.310	89.681	74.000	84.624	89.291
16	71.610	84.420	88.622	73.696	81.075	89.454	73.815	84.624	89.065
17	71.610	84.210	88.622	73.696	80.840	89.454	73.815	84.624	89.065
18	71.400	84.210	88.396	73.508	80.605	89.226	73.630	84.366	88.838
19	71.190	84.000	88.396	73.508	80.605	89.226	73.630	84.366	88.838
20	71.190	83.790	88.396	73.508	80.370	89.226	73.630	84.366	88.838
21	70.980	83.790	88.171	73.320	80.370	88.998	73.445	84.366	88.611
22	70.980	83.790	88.171	73.320	80.135	88.543	73.445	84.366	88.611
23	70.770	83.790	88.171	73.132	80.135	88.541	73.445	84.108	88.611
24	70.770	83.580	87.945	73.132	80.135	88.340	73.260	84.108	88.385
25	70.560	83.580	87.945	73.132	79.900	88.340	73.260	84.108	88.385
26	70.560	83.580	87.720	72.944	79.665	88.340	73.260	84.108	88.158
27	70.350	83.580	87.720	72.944	79.665	88.340	73.075	84.108	88.158
28	70.140	83.370	87.720	72.756	79.430	88.340	72.890	83.850	88.158
29	70.140	83.370	87.494	72.756	79.430	88.340	72.890	83.850	87.931
30	69.930	83.370	87.494	72.756	79.195	88.110	72.705	83.850	87.931

Tabla temperatura v/s tiempo

(Continuación)

	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
Temperatura del fluido =	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
31	69.930	83.370	87.269	72.568	79.195	88.110	72.705	83.592	87.705
32	69.930	83.370	87.269	72.568	78.960	88.110	72.520	83.592	87.705
33	69.930	83.370	87.269	72.380	78.960	88.110	72.520	83.592	87.705
34	69.930	83.370	87.043	72.380	78.725	88.110	72.520	83.592	87.478
35	69.720	83.370	87.043	72.192	78.490	88.110	72.335	83.592	87.478
36	69.720	83.370	86.818	72.192	78.490	88.110	72.335	83.592	87.252
37	69.720	83.370	86.818	72.192	78.255	87.969	72.335	83.592	87.252
38	69.720	83.370	86.592	72.004	78.255	87.969	72.150	83.334	86.783
39	69.510	83.370	86.592	72.004	78.255	87.969	72.150	83.334	86.783
40	69.510	83.370	86.592	72.004	78.255	87.969	71.965	83.334	86.783
41	69.510	83.580	86.367	71.816	78.255	87.969	71.965	83.334	86.557
42	69.510	83.580	86.367	71.816	78.020	87.558	71.965	83.334	86.557
43	69.300	83.580	86.367	71.816	78.020	87.558	71.780	83.334	86.557
44	69.300	83.580	86.141	71.628	78.020	87.558	71.780	83.076	86.331
45	69.300	83.580	86.141	71.628	78.020	87.558	71.595	83.076	86.331
46	69.090	83.580	86.141	71.628	77.785	87.558	71.595	83.076	86.331
47	69.090	83.580	85.916	71.628	77.785	87.087	71.595	83.076	86.105
48	69.090	83.580	85.916	71.440	77.785	87.087	71.410	83.076	86.105
49	69.090	83.580	85.916	71.440	77.785	87.087	71.410	82.818	86.105
50	69.090	83.580	85.916	71.252	77.550	87.087	71.225	82.818	86.105
51	69.090	83.580	85.690	71.252	77.550	87.087	71.225	82.818	85.879
52	68.880	83.790	85.690	71.252	77.550	87.087	71.040	82.818	85.879
53	68.880	83.790	85.465	71.064	77.315	87.061	71.040	82.818	85.653
54	68.880	83.790	85.465	71.064	77.315	87.061	71.040	82.818	85.653
55	68.880	83.790	85.465	71.064	77.315	87.061	70.855	82.818	85.653
56	68.880	83.790	85.330	71.064	77.315	87.061	70.855	82.560	85.518
57	68.670	83.790	85.330	70.876	77.315	87.061	70.855	82.560	85.518
58	68.670	83.790	85.330	70.876	77.315	87.061	70.670	82.560	85.518
59	68.670	83.790	85.330	70.876	77.080	87.061	70.670	82.560	85.518
60	68.670	83.790	85.330	70.876	77.080	87.061	70.670	82.302	85.518
61	68.670	83.790	85.330	70.876	77.080	87.061	70.485	82.302	85.518
62	68.460	83.790	85.239	70.876	77.080	86.828	70.485	82.302	85.427

Tabla temperatura v/s tiempo

(Continuación)

	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
	Temperatura del fluido = 75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
63	68.460	83.580	85.239	70.876	77.080	86.828	70.485	82.302	85.427
64	68.460	83.580	85.239	70.688	76.845	86.828	70.485	82.302	85.427
65	68.460	83.580	85.239	70.688	76.845	86.828	70.300	82.302	85.427
66	68.460	83.370	85.100	70.688	76.845	86.828	70.300	82.302	85.287
67	68.250	83.370	85.100	70.688	76.845	86.828	70.115	82.302	85.287
68	68.250	83.370	85.100	70.688	76.845	86.594	70.115	82.302	85.287
69	68.250	83.160	85.014	70.688	76.610	86.594	70.115	82.302	85.201
70	68.040	83.160	85.014	70.688	76.610	86.594	69.930	82.302	85.201
71	68.040	83.160	85.014	70.688	76.610	86.594	69.930	82.302	85.201
72	68.040	82.950	85.014	70.500	76.610	86.594	69.930	82.044	85.201
73	68.040	82.740	85.014	70.500	76.610	86.594	69.930	82.044	85.201
74	68.040	82.740	85.014	70.500	76.375	86.361	69.745	82.044	85.201
75	68.040	82.530	85.014	70.500	76.375	86.361	69.745	82.044	85.201
76	68.040	82.530	84.870	70.312	76.375	86.361	69.745	82.044	85.057
77	67.830	82.320	84.870	70.312	76.140	86.127	69.745	82.044	85.048
78	67.830	82.320	84.870	70.312	76.140	86.127	69.745	82.044	85.048
79	67.830	82.320	84.870	70.312	76.140	86.127	69.745	82.044	85.048
80	67.830	82.110	84.870	70.312	76.140	86.127	69.745	82.044	85.048
81	67.830	82.110	84.870	70.312	76.140	86.127	69.560	81.786	85.048
82	67.830	82.110	84.870	70.312	76.140	86.127	69.560	81.786	85.048
83	67.620	81.900	84.870	70.312	76.140	86.127	69.560	81.786	85.048
84	67.620	81.900	84.870	70.312	75.905	86.127	69.560	81.786	85.048
85	67.620	81.690	84.812	70.312	75.905	86.127	69.560	81.786	84.990
86	67.620	81.690	84.808	70.312	75.905	85.894	69.560	81.786	84.986
87	67.620	81.690	84.799	70.312	75.905	85.894	69.560	81.786	84.977
88	67.410	81.480	84.799	70.312	75.905	85.894	69.560	81.786	84.977
89	67.410	81.480	84.799	70.312	75.905	85.894	69.375	81.786	84.977
90	67.410	81.270	84.799	70.124	75.670	85.894	69.375	81.528	84.901
91	67.410	81.270	84.797	70.124	75.670	86.127	69.375	81.528	84.899
92	67.410	81.270	84.793	70.124	75.670	86.127	69.375	81.528	84.895
93	67.410	81.060	84.799	70.124	75.670	86.127	69.190	81.528	84.901
94	67.410	81.060	84.799	70.124	75.670	86.127	69.190	81.528	84.901

Tabla temperatura v/s tiempo

(Continuación)

Temperatura del fluido =	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
95	67.200	80.850	84.799	70.124	75.435	86.127	69.190	81.528	84.901
96	67.200	80.850	84.799	70.124	75.435	86.127	69.190	81.528	84.901
97	67.200	80.640	84.640	70.124	75.435	86.127	69.190	81.528	84.742
98	67.200	80.640	84.640	70.124	75.435	85.894	69.190	81.528	84.742
99	66.990	80.640	84.640	69.936	75.435	85.894	69.190	81.528	84.742
100	66.990	80.430	84.640	69.936	75.435	85.894	69.190	81.528	84.742
101	66.990	80.430	84.640	69.936	75.435	85.894	69.190	81.528	84.742
102	66.990	80.430	84.635	69.936	75.200	85.894	69.190	81.528	84.712
103	66.990	80.220	84.635	69.936	75.200	85.894	69.190	81.528	84.712
104	66.990	80.220	84.635	69.936	75.200	85.894	69.190	81.270	84.712
105	66.990	80.220	84.635	69.748	75.200	85.894	69.190	81.270	84.712
106	66.990	80.010	84.635	69.748	74.965	85.894	69.190	81.270	84.712
107	66.990	80.010	84.635	69.748	74.965	85.661	69.005	81.270	84.712
108	66.990	80.010	84.635	69.748	74.965	85.661	69.005	81.270	84.712
109	66.990	80.010	84.573	69.748	74.965	85.661	69.005	81.270	84.649
110	66.990	79.800	84.573	69.748	74.965	85.661	69.005	81.012	84.649
111	66.780	79.800	84.573	69.560	74.965	85.661	69.005	81.012	84.649
112	66.780	79.590	84.573	69.560	74.965	85.661	69.005	81.012	84.649
113	66.780	79.590	84.573	69.560	74.965	85.661	69.005	81.012	84.649
114	66.780	79.590	84.573	69.372	74.965	85.661	69.005	81.012	84.649
115	66.780	79.380	84.573	69.372	74.965	85.661	69.005	81.012	84.649
116	66.780	79.380	84.573	69.372	74.965	85.661	68.820	80.754	83.581
117	66.780	79.380	84.573	69.372	74.965	85.661	68.820	80.754	83.581
118	66.780	79.380	84.573	69.372	74.730	85.661	68.820	80.754	83.581
119	66.780	79.170	84.573	69.372	74.730	85.427	68.820	80.754	83.581
120	66.570	79.170	84.573	69.372	74.730	85.427	68.820	80.754	83.581
121	66.570	79.170	84.573	69.372	74.730	85.427	68.820	80.754	83.581
122	66.570	79.170	84.573	69.372	74.730	85.427	68.635	80.496	83.230
123	66.570	79.170	84.571	69.184	74.730	85.427	68.635	80.496	83.208
124	66.570	79.170	84.571	69.184	74.730	84.960	68.635	80.496	83.290
125	66.570	79.170	84.571	69.184	74.730	84.727	68.635	80.496	83.290
126	66.570	78.960	84.571	69.184	74.730	84.027	68.635	80.496	83.290

Tabla temperatura v/s tiempo

(Continuación)

Temperatura del fluido =	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
127	66.570	78.960	84.571	69.184	74.495	83.326	68.635	80.496	83.290
128	66.570	78.960	84.571	69.372	74.495	82.626	68.450	80.496	83.290
129	66.360	78.960	84.571	69.372	74.495	82.159	68.450	80.496	83.290
130	66.360	78.960	84.571	69.372	74.495	81.693	68.450	80.496	83.290
131	66.360	78.960	84.571	69.372	74.495	81.226	68.265	80.238	83.290
132	66.360	78.960	84.570	69.372	74.495	80.992	68.265	80.238	83.290
133	66.360	78.960	84.570	69.372	74.495	80.759	68.265	80.238	83.290
134	66.360	78.750	84.570	69.372	74.495	80.526	68.265	80.238	83.179
135	66.360	78.750	84.570	69.184	74.495	80.292	68.265	80.238	83.179
136	66.360	78.750	84.570	69.184	74.260	80.059	68.265	80.238	83.179
137	66.360	78.750	84.570	69.184	74.260	80.059	68.265	80.238	83.179
138	66.360	78.540	84.570	69.184	74.260	79.825	68.265	80.238	83.179
139	66.360	78.540	84.570	69.184	74.260	79.825	68.265	80.238	83.179
140	66.360	78.540	84.570	69.184	74.260	79.824	68.080	80.238	83.179
141	66.360	78.540	84.568	69.184	74.260	79.824	68.080	80.238	83.179
142	66.360	78.540	84.568	69.184	74.260	79.824	68.080	79.980	83.179
143	66.150	78.540	84.568	69.184	74.260	79.590	68.080	79.980	83.179
144	66.150	78.540	84.568	68.996	74.260	79.356	68.080	79.980	83.179
145	66.150	78.540	84.568	68.996	74.260	79.356	68.265	79.980	83.179
146	66.150	78.540	84.568	68.996	74.260	79.352	68.265	79.722	83.179
147	66.150	78.540	84.568	68.996	74.260	79.352	68.265	79.722	83.179
148	66.150	78.540	84.568	68.996	74.260	79.270	68.265	79.722	82.665
149	65.940	78.540	84.568	68.996	74.260	79.270	68.265	79.722	82.665
150	65.940	78.540	84.568	68.996	74.025	79.188	68.265	79.722	82.665
151	65.940	78.540	84.568	68.996	74.025	79.188	68.265	79.722	82.665
152	65.940	78.330	84.568	68.996	74.025	79.028	68.080	79.464	82.595
153	65.940	78.330	84.344	68.996	74.025	79.017	68.080	79.464	82.595
154	65.940	78.330	84.344	68.996	74.025	79.017	68.080	78.557	82.595
155	65.730	78.330	84.344	68.996	74.025	79.017	68.080	78.407	82.595
156	65.730	78.330	84.344	68.808	73.790	79.017	68.080	78.239	82.595
157	65.730	78.330	84.344	68.808	73.790	79.017	68.080	78.329	82.595
158	65.730	78.330	84.344	68.808	73.790	79.017	68.080	78.329	82.595

Tabla temperatura v/s tiempo

(Continuación)

Temperatura del fluido =	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
159	65.730	78.330	84.337	68.808	73.790	78.942	68.080	78.329	82.595
160	65.730	78.330	84.337	68.808	73.790	78.942	68.080	77.307	82.595
161	65.520	78.120	84.337	68.432	73.790	78.942	67.895	77.253	82.595
162	65.520	78.120	84.337	68.244	73.555	78.942	67.895	77.253	82.595
163	65.520	78.120	84.337	67.680	73.555	78.942	67.895	77.253	82.392
164	65.520	78.120	83.877	67.116	73.555	78.808	67.895	77.253	82.392
165	65.520	78.120	83.817	66.552	73.555	78.808	67.895	77.253	82.392
166	65.520	78.120	83.815	66.176	73.555	78.808	67.895	77.253	82.392
167	65.520	77.910	83.811	65.800	73.555	78.808	67.895	77.253	82.392
168	65.520	77.910	83.811	65.424	73.320	78.808	67.895	76.955	82.392
169	65.520	77.910	83.717	65.236	73.320	78.808	67.895	76.955	82.392
170	65.310	77.910	83.717	65.048	73.320	78.808	67.895	76.955	82.392
171	65.310	77.910	83.707	64.860	73.320	78.808	67.895	75.778	82.392
172	65.310	77.910	83.707	64.672	73.320	78.808	67.895	75.761	82.392
173	65.310	77.700	83.707	64.484	73.320	78.694	67.710	75.761	82.392
174	65.310	77.700	83.707	64.484	73.320	78.694	67.710	75.435	82.392
175	65.310	77.700	83.707	64.296	73.320	78.694	67.710	75.435	82.392
176	65.310	77.490	83.707	64.296	73.320	78.694	67.710	75.435	82.392
177	65.310	77.490	83.707	64.108	73.085	78.694	67.710	75.422	82.392
178	65.310	77.490	83.707	64.108	73.085	78.694	67.340	75.422	82.392
179	65.310	77.490	83.707	64.108	73.085	78.694	67.155	75.412	81.965
180	65.310	77.490	83.700	63.920	73.085	78.694	66.600	75.412	81.965
181	65.100	77.490	83.700	63.732	73.085	78.694	66.045	75.412	81.965
182	65.100	77.490	83.700	63.732	73.085	78.694	65.490	75.351	81.965
183	65.100	77.490	83.700	63.544	73.085	78.567	65.120	75.351	81.814
184	65.100	77.490	83.700	63.544	73.085	78.567	64.750	75.351	81.814
185	64.890	77.280	83.700	63.356	73.085	78.567	64.380	75.315	81.814
186	64.890	77.280	83.700	63.356	73.085	78.567	64.195	75.315	81.814
187	64.890	77.280	83.700	63.168	73.085	78.567	64.010	75.315	81.645
188	64.890	77.280	83.700	63.168	72.850	78.567	63.825	75.315	81.645
189	64.890	77.280	83.700	62.980	72.850	78.567	63.640	75.311	81.645
190	64.890	77.490	83.700	62.792	72.850	78.567	63.455	75.311	81.531

Tabla temperatura v/s tiempo

(Continuación)

Temperatura del fluido =	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]	75 [°C]	85 [°C]	90 [°C]
191	64.680	77.490	83.700	62.792	72.850	78.567	63.455	75.309	81.531
192	64.680	77.490	83.700	62.604	72.615	78.567	63.270	75.309	81.531
193	64.680	77.490	83.686	62.604	72.615	78.567	63.270	75.309	81.518
194	64.680	77.490	83.686	62.604	72.615	78.567	63.085	75.309	81.391
195	64.680	77.490	83.661	62.604	72.615	78.567	63.085	75.309	81.310
196	64.680	77.490	83.661	62.604	72.615	78.567	63.085	75.309	81.222
197	64.680	77.280	83.661	62.416	72.615	78.567	62.900	75.309	81.222
198	64.680	77.280	83.661	62.416	72.380	78.567	62.715	75.309	81.222
199	64.680	77.280	83.661	62.416	72.380	78.567	62.715	75.309	81.222
200	64.680	77.280	83.661	62.416	72.380	78.567	62.530	75.309	81.222

## ANEXO 8

### Especificaciones técnicas equipo datalogger

#### ESPECIFICACIONES

El usuario puede configurar fácilmente el registrador y ver los datos transferidos al conectar el registrador al puerto USB de un PC y utilizando el software gratuito **EasyLog 21CFR**. Los datos se pueden graficar, imprimir y exportar a otras aplicaciones para un análisis detallado. Los datos cifrados tienen un seguimiento de auditoría de modo que cumplan con los requisitos de 21CFR Parte 11.

La pantalla LCD de alto contraste puede mostrar una variedad de información de temperatura. Al presionar el botón el usuario puede desplazarse entre el valor actual de temperatura, y los valores máximos y mínimos almacenados.

El registrador de datos funciona con una batería de litio. El registrador está protegido contra la entrada de agua y polvo bajo la norma IP67 cuando tiene la tapa instalada.



- Software EasyLog 21CFR disponible para descarga gratuita compatible hasta Windows 10 64bit
- Pantalla LCD de alto contraste de dos y medio dígitos para la indicación de temperatura
- 3 modos de inicio de registro: manual, inmediato y con tiempo de retardo
- Límites de alarma programables por el usuario
- Sistema compatible con 21CFR Parte 11

CÓDIGO	H4035601	H4035628
Rango temperatura	-35 + 80°	-40 + 125 °C
Resolución	0.5 °C	0.5 °C
Exactitud	± 1 °C	± 1.5°C a 125 °C
Razón de muestreo	de 10 seg hasta 12 hrs	de 1 seg hasta 12 hrs
Duración de batería	3 años (a 25°C y razón de muestreo 1 min y LCD encendido)	2 años (a 25°C y razón de muestreo 1 min y Display LCD encendido)
Memoria	16.378 muestras	32.510 muestras
Cable sensor externo	n/a	1 m
Tamaño	120 x 25 x 22 mm	135 x 24 x 21 mm

Fuente: Veto y Cía. Ltda.