



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
Mención en Ingeniería Mecánica

## **Modelación de un estanque estratificado de contacto directo mediante el método CFD**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería  
Mención Mecánica

Carlos Felipe Micolich Espejo

Concepción-Chile

2018

Profesor Guía: Cristian Cuevas Barraza

Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería

Universidad de Concepción

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
CAPITULO 1: Introducción .....	1
1.1    Contextualización del problema.....	1
1.2    Estado del arte .....	2
1.2.1    Modelos unidimensionales.....	3
1.2.2    Modelos bidimensionales.....	4
1.2.3    Modelos tridimensionales .....	4
1.3    Hipótesis.....	6
1.4    Objetivos .....	6
1.5    Metodología de trabajo.....	6
1.6    Alcances .....	7
CAPITULO 2: Marco teórico .....	8
2.1    Sistemas solares.....	8
2.2    Descripción de estanque de almacenamiento.....	9
CAPITULO 3: Descripción del banco de ensayos y de los resultados experimentales...12	
3.1    Descripción general.....	12
3.2    Mediciones .....	15
3.2.1    Temperatura .....	15
3.2.2    Caudal .....	15
3.3    Resultados experimentales .....	16
CAPITULO 4: Modelo geométrico y mallado.....	17
4.1    Dimensiones del estanque .....	17
4.2    Mallado del estanque.....	18
CAPITULO 5: Modelo físico.....	21
5.1    Ecuaciones que gobiernan el modelo .....	21
5.2    Condiciones de borde .....	23
5.3    Descripción del fluido (agua).....	23
5.4    Descripción de la pared .....	25
CAPITULO 6: Resultados de las simulaciones y validación de la metodología.....	28

6.1	Descripción del ensayo realizado .....	28
6.2	Definición de las condiciones de entrada .....	29
6.3	Resultados .....	31
6.3.1	Convergencia de grilla .....	31
6.3.2	Comparación de tipos de condiciones de pared .....	34
6.4	Observaciones generales y propuestas de mejora del ensayo .....	36
CAPITULO 7: Análisis de los resultados y discusiones.....		37
7.1	Campos de temperatura .....	37
7.2	Variación de las temperaturas con respecto a la posición de las termocuplas ..	38
7.3	Efecto del espesor de la pared del estanque .....	39
7.4	Campos de velocidad.....	40
CAPITULO 8: Conclusiones y perspectivas .....		44
8.1	Conclusiones .....	44
8.2	Perspectivas .....	45
REFERENCIAS .....		46
ANEXOS .....		49
A.1	Anexos A: Rutero UDF para condiciones de entrada (temperaturas ambiente, entrada de agua caliente y de la red) .....	49

## RESUMEN

El sistema solar térmico es una de las alternativas para producir agua caliente sanitaria de una manera eficiente y con bajo impacto sobre el medio ambiente. Estos sistemas captan energía solar a través de colectores, siendo posteriormente almacenada en un acumulador. Aquí ocurre un fenómeno que cumple un rol importante en el rendimiento térmico, denominado estratificación. Este fenómeno se puede aprovechar para maximizar la eficiencia térmica del sistema solar.

El objetivo del presente trabajo es principalmente realizar una simulación de un estanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria (tipo contacto directo) usando el método CFD para evaluar el efecto de la conducción axial y radial de la pared del estanque sobre la estratificación del agua almacenada en este. Para lograr esto, se simulan cuatro tipos de condiciones de pared: agua sin pared con condición de borde adiabática, agua y pared con condición de borde adiabática, agua, pared y aislante con condición de borde adiabática y agua, pared y aislante con transferencia de calor al ambiente.

Para cumplir los objetivos se debe realizar un estudio bibliográfico sobre los sistemas solares, y en particular sobre el estanque de acumulación de agua caliente. Se identifican y describen los modelos de simulación existentes, tanto los semi-empíricos unidimensionales como los modelos basados en el método CFD, para utilizarlos como referencia en la modelación realizada en este estudio. Posteriormente, se describe el sistema que se utiliza para validar el modelo de simulación. Se realiza el modelo geométrico, el mallado y el modelo físico del problema, destacando los aspectos particulares de la simulación a realizar. Posteriormente se propone una serie de simulaciones para responder a los objetivos planteados y dar a conocer la contribución que se pretende realizar con este trabajo.

Con respecto a los resultados, se obtiene que la comparación con los datos experimentales obtenidos del memorista (Saelzer, 2015) cumplen la misma tendencia en la mayor parte de la termocuplas utilizadas en el ensayo para todos los casos de estudio. Las variables que probablemente causan estas discrepancias son las condiciones de entrada y la propiedad del agua que se considera como isotrópica. También se realizan una serie de propuestas con el fin de mejorar las condiciones experimentales para obtener resultados más cercanos a la realidad. La diferencia máxima obtenida fue de 2,7 [°C]. En cuanto al análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, se realiza un análisis del contorno de temperaturas y de velocidades, efectos de conducción, entre otros.

Se cumplen los objetivos planteados en este trabajo, demostrándose que, para este caso en particular, las condiciones de pared del estanque no influyen en forma significativa en la estratificación del agua en el estanque.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado de un SST (Fuente: Elaboración propia).....	8
Figura 2. Diferentes grados de estratificación dentro de un tanque de almacenamiento con la misma cantidad de calor almacenado (Haller et al., 2009); (a) muy estratificada, (b) moderadamente estratificado y (c) completamente mezclado, no estratificada. ....	9
Figura 3. Esquema del banco de ensayos (Saelzer, 2015). ....	12
Figura 4. Resultados experimentales de un ensayo a validar (Fuente: Elaboración propia). ....	16
Figura 5. Modelo geométrico del estanque (Fuente: Elaboración propia).....	17
Figura 6. Mallado del estanque (Fuente: Elaboración propia). ....	18
Figura 7. Densidad de agua en función de temperatura (Fuente: Elaboración propia)....	24
Figura 8. Conductividad de agua en función de temperatura (Fuente: Elaboración propia). ....	24
Figura 9. Viscosidad dinámica de agua en función de temperatura (Fuente: Elaboración propia). ....	25
Figura 10. Composición de un estanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia). ....	26
Figura 11. Temperatura entrada caliente vs tiempo (Fuente: Elaboración propia). ....	29
Figura 12. Temperatura de agua de red vs tiempo (Fuente: Elaboración propia). ....	30
Figura 13. Temperatura de aire vs tiempo (Fuente: Elaboración propia). ....	30
Figura 14. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintos tipos de mallado (Parte 1) (Fuente: Elaboración propia). ....	31
Figura 15. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintos tipos de mallado (Parte 2) (Fuente: Elaboración propia). ....	32
Figura 16. Contornos de temperatura para distinto tipos de mallado (para el caso N°4) (Fuente: Elaboración propia).....	33
Figura 17. Niveles de contornos de temperatura altura vs tiempo para distintos mallados (para el caso N°4) (Fuente: Elaboración propia); (a) Mallado 1, (b) Mallado 2 y (c) Mallado 3 . ....	33
Figura 18. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintas condiciones de pared en distintas posiciones (Parte 1) (Fuente: Elaboración propia). ....	34
Figura 19. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintas condiciones de pared en distintas posiciones (Parte 2) (Fuente: Elaboración propia). ....	35
Figura 20. Contornos de temperatura para distinto tiempos de simulación (para el caso N°4) (Fuente: Elaboración propia).....	37

Figura 21. Contorno de temperatura altura vs tiempo (Fuente: Elaboración propia). ....	38
Figura 22. Gráfico de perfil de temperatura temporal de la termocupla N°5 con banda de error de posición de $\pm 5$ [cm] (Fuente: Elaboración propia). ....	39
Figura 23. Contornos de temperatura del estanque de ensayo modificado para distinto tiempos de simulación (Fuente: Elaboración propia). ....	40
Figura 24. Contorno de velocidad (Tiempo de simulación = 2400 [s]) (Fuente: Elaboración propia). ....	41
Figura 25. Contornos de velocidad en vector (Tiempo de simulación = 2400 [s]) (Fuente: Elaboración propia): (a) Parte Inferior, (b) Parte superior. ....	42
Figura 26. Contornos de velocidad Z en distintos cortes transversales (Tiempo de simulación = 2400 [s]) (Fuente: Elaboración propia): (a) Altura = 200 [mm], (b) Altura = 550 [mm], (c) Altura = 900 [mm]. ....	43



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los dos tipos de estanques (Fuente: Elaboración propia). .....	10
Tabla 2. Especificación técnica de la bomba PLASET (Fuente: Elaboración propia). ...	14
Tabla 3. Especificación técnica de la bomba Pedrollo (Fuente: Elaboración propia). ....	14
Tabla 4. Cantidad de elementos y nodos para cada mallado (Fuente: Elaboración propia). .....	19
Tabla 5. Calidad ortogonal mínima y razón de aspecto máximo para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).....	19
Tabla 6. Distribución de celdas del modelo según la distorsión angular para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).....	20
Tabla 7. Distribución de celdas del modelo según la razón de aspecto para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).....	20
Tabla 8. Condiciones de borde (Fuente: Elaboración propia).....	23
Tabla 9. Condición de borde pared para distintos casos de estudio (Fuente: Elaboración propia). .....	26
Tabla 10. Propiedades de las capas de sólidos (Fuente: Elaboración propia).....	27
Tabla 11. Ubicación vertical de termocuplas (Fuente: Elaboración propia).....	28

## NOMENCLATURA

A	: Área [m <sup>2</sup> ]
c	: Calor específico [J/kgK]
d	: Diámetro [m]
E	: Energía [J]
e	: Espesor [m]
G	: Generación
g	: Gravedad (vector) [m/s <sup>2</sup> ]
H	: Altura [m]
k	: Energía cinética turbulenta [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
L	: Longitud [m]
P	: Presión [Pa]
S	: Fuente/Sumidero
T	: Temperatura [K]
t	: Tiempo [s]
u	: Velocidad (vector) [m/s]
V	: Volumen [m <sup>3</sup> ]
X	: Posición (vector) [m]
Y	: Disipación
y <sup>+</sup>	: Distancia adimensional a la pared [-]

### Subíndice

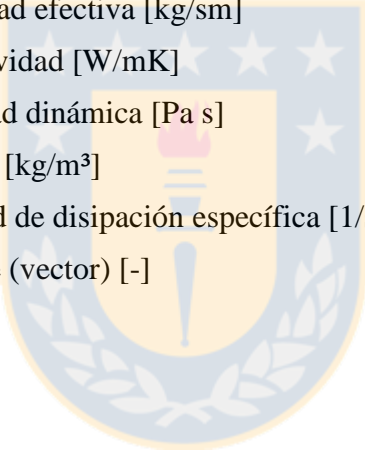
a	: Aire
c	: Caliente
col	: Colector solar
ent	: Entrada
f	: Frío/consumo
h	: Calor
IC	: Intercambiador de calor
k	: Turbulenta
p	: Presión constante



sal	: Salida
TK	: Estanque
w	: Agua
x	: Componente vector x
y	: Componente vector y
z	: Componente vector z
$\omega$	: Disipación

### Símbolos griegos

$\Delta$	: Diferencia [-]
$\Gamma$	: Difusividad efectiva [kg/sm]
$\lambda$	: Conductividad [W/mK]
$\mu$	: Viscosidad dinámica [Pa s]
$\rho$	: Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	: Velocidad de disipación específica [1/s]
$\nabla$	: Gradiente (vector) [-]



# CAPITULO 1

## Introducción

### 1.1 Contextualización del problema

El continuo aumento de los precios de los combustibles fósiles sumado a la contaminación que estos producen, motiva a explorar energías más baratas y menos contaminantes como la energía solar, para utilizarla, por ejemplo, para la producción de agua caliente sanitaria o para convertirla en energía eléctrica. Esta presenta además la ventaja de ser una energía renovable. En particular, este estudio se centra en la energía solar para calentamiento de agua sanitaria, la cual ha tenido un incremento significativo en nuestro país considerando la franquicia tributaria que ofrece el gobierno. La principal dificultad que tiene este tipo de sistema es el desfase que existe entre la oferta de energía solar y la demanda de agua caliente sanitaria, lo cual en la práctica es amortiguado utilizando un estanque de almacenamiento de agua caliente. El desempeño de estos sistemas es generalmente evaluado en forma dinámica, considerando modelos unidimensionales de cada uno de los componentes. La exactitud del resultado de estas simulaciones depende en gran medida del nivel de detalle utilizado para la modelación del estanque de almacenamiento de agua caliente, para lo que existen dos tipos de aproximaciones: estanque completamente mezclado y estanque estratificado. El error en que se puede incurrir en este tipo de cálculo puede llegar hasta un 7% para una simulación anual según el estudio (Jerez, J., 2015). El sol ofrece energía solar cada día a nuestro planeta y con el tiempo se debe aprovechar la mayor cantidad posible, ya que es una de las fuentes de energía que se puede considerar inagotables. Sin embargo, es necesario desarrollar procesos que permitan obtener esta energía con mayor eficiencia. Una de las alternativas para aprovechar esta energía en forma limpia y sustentable, con fines de consumo de agua caliente es el denominado sistema solar térmico (SST). Los SST captan energía solar para producir Agua Caliente Sanitaria (ACS). Los elementos esenciales de estos sistemas son los colectores solares y el estanque de almacenamiento (o acumulador). Éste último cumple la función de almacenar la energía solar como agua caliente. Cabe mencionar que en el interior del estanque se produce un fenómeno natural importante que influye en la eficiencia energética llamado estratificación.

La estratificación es el fenómeno en que el fluido se distribuye en forma vertical según su temperatura (gradiente vertical de temperatura). Este efecto se debe a la heterogeneidad de las densidades que tiene en el volumen interno del estanque, donde el fluido caliente tiende a subir y el frío a bajar.

Por lo tanto, el desempeño de un sistema solar depende en gran medida del sistema de almacenamiento de energía solar del que este dispone. En la literatura existen numerosos

modelos de simulación para evaluar el desempeño del estanque, los cuales consideran factores empíricos y análisis unidimensionales. Para poder entender de mejor manera y proponer mejoras a los modelos existentes, se propone realizar un modelo de simulación mediante el método CFD para evaluar el efecto de la conducción axial y radial de la pared del estanque sobre la estratificación.

## 1.2 Estado del arte

Los estanques estratificados tienen como función recolectar y almacenar la energía térmica proveniente del sol (en forma natural) y/o de equipos auxiliares. Estos estanques pueden ser de contacto directo o indirecto. Existen estudios que han clasificado la estratificación y las causas que la producen. También se han modelado varios tipos de estanque logrando predecir en forma satisfactoria las condiciones experimentales.

En la recopilación (Haller et al., 2009) explica distintos métodos para determinar la eficiencia de estratificación térmica de estanques térmicos. Clasifica los tipos de estratificación según el grado del gradiente de temperatura, explica los índices que involucran el grado de estratificación y los métodos de estimación de las eficiencias en base a las 2 primeras leyes de la termodinámica y otras variables, como la fracción volumétrica de extracción y la cantidad de mezcla.

Los autores (Han et al., 2009) realizan una recopilación de estudios acerca de los diferentes tipos de estanques estratificados y sus métodos de investigación, destacando los beneficios de la estratificación térmica dentro de un estanque acumulador de agua caliente. Clasifican los estanques estratificados en dos categorías principales: de calentamiento indirecto (intercambiador de calor inmerso, intercambiador de calor externo e intercambiador de calor de manto) y de calentamiento directo, en donde la estratificación térmica puede ser destruida con mayor facilidad debido a la turbulencia del agua que entra y sale del estanque. Mencionan una serie de dispositivos como placas deflectoras o mallas porosas, para mantener la estratificación del agua sin ser destruida por los flujos de entrada y salida. Se analizan también los diferentes modelos de simulación de estratificación térmica dentro del estanque, concluyendo que los modelos unidimensionales no pueden describir en detalle el comportamiento del agua, especialmente cuando está sometido a grandes flujos y a configuraciones complejas del estanque. Los modelos bidimensionales toman en cuenta una mayor cantidad de factores y simulan con mayor precisión el comportamiento del agua; sin embargo, igualmente presentan limitaciones, debido a que la estratificación térmica es un proceso físico complejo que no sólo es afectado por la estructura geométrica del estanque, sino también por condiciones de operación, que no pueden ser descritas por un modelo bidimensional. Muchas de las suposiciones de un modelo pueden estar basadas en datos erróneos que finalmente conllevan a resultados que no representan su comportamiento real. Estos modelos bidimensionales establecen que la difusión térmica del agua dentro del estanque no es un parámetro significativo que cause la ruptura de la estratificación en estanques verticales. La degradación de la estratificación térmica se ve afectada por la conducción

del calor a lo largo de las paredes del estanque y por la pérdida de calor hacia el ambiente. En un modo de operación dinámico, los efectos de mezcla son mucho más grandes que los parámetros de una operación estática. Sin embargo, se debe prestar atención al modo estático, ya que representa a la condición de funcionamiento más frecuente del estanque acumulador.

Existen diversos trabajos que intentan identificar variables geométricas y de operación que influyen en la estratificación. Para ello se debe generar un modelo para simular, obtener resultados y comparar con datos experimentales. En este capítulo se detallan en forma resumida algunos de los 3 tipos de modelos de simulación que se investigaron en este estudio:

- Modelos unidimensionales.
- Modelos bidimensionales.
- Modelos tridimensionales.

### **1.2.1 Modelos unidimensionales**

Las ecuaciones que gobiernan los volúmenes del fluido y la pared de estanque son los balances de energía. Normalmente estos tipos de modelos se resuelven en forma numérica discretizando la altura en nodos (volúmenes finitos en forma general). Existen modelos de este tipo que son utilizados en software comerciales (como TRNSYS). La ventaja de estos modelos es que el costo computacional es muy bajo, ya que cada nodo involucra una ecuación de balance de energía.

El estudio (Rahman et al., 2016) presentan un modelo semi-empírico unidimensional transitorio de un estanque de almacenamiento térmico utilizando un modelo de 10 nodos que representa la transferencia de calor y un modelo de nodo de mezcla que representa la flotabilidad dentro del estanque. El estanque es de contacto indirecto con 2 intercambiadores de calor: uno para agua caliente y otro para agua fría. Se estudian los perfiles de temperatura para:

- Una entrada de flujo de agua caliente en forma sinusoidal.
- Un cambio del flujo de agua caliente y fría (o cambio de número de Reynolds).
- Un cambio de la posición de la altura de entrada y salida del agua caliente y fría.

Además se cuantifican las pérdidas de calor al ambiente variando el espesor del aislante.

El estudio (Hoffmann et al., 2016) estudian la zona termoclina comparando dos modelos numéricos (modelo monofásico y bifásico) y tres series de mediciones experimentales obtenidas de “Promes-CNRS Laboratory demonstrator”, “Sandia National Laboratory” y “Solar One”, a través de los perfiles de temperatura.

También se comparan el modelo bifásico con el simplificado, despreciando el efecto de conducción en la pared y las pérdidas de calor al ambiente, concluyendo que estos efectos no fueron importantes en los resultados. También se analiza el efecto de la discretización axial y se demuestra que las zonas extremas de la termoclina presentan

gran cantidad de variaciones cuando se usan pocos elementos, determinando una cantidad óptima, de modo de minimizar el costo computacional.

### **1.2.2 Modelos bidimensionales**

Estos modelos se realizan con simplificación asimétrica y, por ende, se resuelven numéricamente en coordenadas cilíndricas. Pueden ser simulados usando el método CFD o por balance de energía (a diferencia del modelo unidimensional se agrega eje de coordenada radial).

El estudio (Zachár et al., 2003) realizan un análisis numérico de un estanque estratificado, con dos entradas concéntricas en la cara superior e inferior. En la simulación evalúan el desempeño de la placa metálica en su interior mediante el método CFD y en forma experimental en régimen transitorio. Se analiza el efecto de la resolución del mallado para 3 casos, con el objeto de verificar el efecto del refinado de la malla y elegir de esta forma el mallado adecuado para efectuar la simulación. Se obtienen resultados aceptables sobre los perfiles de temperatura para 3 casos:

- Flujo entrando en la cara superior a una temperatura mayor que la inicial.
- Flujo entrando en la cara inferior a una temperatura menor que la inicial.
- Flujo entrando en la cara superior a una temperatura menor que la inicial.

Como resultado, al utilizar una placa instalada al interior mejora considerablemente el efecto de la estratificación y, por ende, el rendimiento térmico del estanque. Además, se comparan los perfiles de temperatura para distintos tamaños de placa, pero en este caso el cambio en el rendimiento no fue significativo. Para el caso de flujo entrando en la cara inferior a una temperatura menor que la inicial, se obtiene que a mayor flujo de agua mejora significativamente la estratificación.

El estudio (Dehghan & Barzegar, 2010) analizan numéricamente, mediante una simulación bidimensional en coordenadas cilíndricas, el comportamiento térmico transiente de un estanque acumulador vertical con intercambiador de calor de tipo manto con flujo de consumo. Se estudiaron los efectos de los números de Grashof y Reynolds y los tamaños de los ductos de entrada y salida del estanque. Finalmente, se concluye que se puede lograr un buen rendimiento térmico manteniendo una alta diferencia de temperatura entre la salida del colector y la entrada del agua fría al estanque, manteniendo la velocidad de entrada del agua y los tamaños de los ductos bajo un cierto límite. Esto asegura condiciones de consumo adecuadas del agua, tanto en volumen como en temperatura.

### **1.2.3 Modelos tridimensionales**

Estos modelos también se resuelven usando métodos CFD y se utilizan cuando no se pueden realizar simplificaciones (debido a la geometría, efectos de turbulencia, entre

otros). Dado que estos modelos dan resultados más detallados debido a la mayor cantidad de ecuaciones que se utilizan para resolver el problema, el costo computacional es más alto que para los otros tipos de modelos.

El estudio (Yaïci et al., 2013) simulan un estanque térmico con un diseño óptimo mediante el método CFD modelado tridimensionalmente en régimen transiente. Validan las mediciones y los resultados obtenidos del autor [Zachár, A. et al. 2003] y analizan lo siguiente:

- El efecto de cambio geométrico: Analiza y compara el cambio de razón altura y diámetro para un rango entre 2,0 y 3,5 para 2 tiempos distintos de 500 [s] y 1000 [s]) en 2 casos: altura constante/diámetro variable y altura variable/diámetro constante. Para el primer caso, con una altura fija de 1194 [mm], se obtuvo que para todos los casos la fracción de la zona caliente va aumentando en el tiempo, que el efecto de la estratificación es más moderado y que a mayor razón altura/diámetro la parte superior llega más rápidamente a la temperatura de entrada del flujo caliente. Para el segundo caso, el efecto de la estratificación es más moderado en el tiempo, donde a mayor razón altura/diámetro, la fracción de zona fría es mayor. Se analiza también el cambio de posición del ducto de entrada para un estanque de 442 [mm] de diámetro y 1194 [mm] de altura, obteniendo como resultado que mientras la posición de este ducto desciende, la estratificación es más deficiente, no obstante, con el tiempo este efecto se vuelve más moderado para todos los casos. Es decir, si la posición del ducto se ubica más abajo la temperatura en la parte superior del estanque reduce más con respecto a la entrada del ducto.
- El efecto de cambio del punto de operación: Se analiza el desempeño de un estanque de un diámetro de 442 [mm] y de una altura de 1194 [mm] para 2 tiempos (500 [s] y 1000[s]) y considerando las siguientes condiciones:: un flujo másico de agua a la entrada variando de 0,05 a 0,20 [kg/s], una temperatura de entrada variando de 40 a 60 [°C] y una temperatura inicial variando de 25 a 45 [°C]. Al aumentar el flujo la zona caliente aumenta rápidamente de forma progresiva en el tiempo. Al cambiar la temperatura de entrada el desempeño del estanque no se ve afectado con respecto a la distribución de temperatura para la totalidad de los casos, no obstante, con el tiempo para todos los casos se observa un aumento progresivo de la fracción de zona caliente.

El estudio (Fan & Furbo, 2012) estudian el movimiento del agua dentro de un estanque cilíndrico de agua caliente estratificado durante su enfriamiento mediante CFD. El estudio muestra que sin la presencia de estratificación térmica, existe un flujo de agua descendente considerable dentro del estanque. Este efecto es producto de la pérdida de calor en los bordes del estanque, lo cual desplaza el agua fría hacia abajo, lo que contribuye a la formación de estratificación. Con la presencia de estratificación el flujo de agua dentro del estanque se reduce considerablemente. La velocidad media en la estratificación térmica no depende del volumen del fluido contenido en el estanque, pero sí es ligeramente afectado por la relación alto/diámetro del mismo estanque. Se determinó una ecuación que determina esta velocidad, la cual se relaciona con el gradiente de temperaturas en el interior y que es

aplicable para un estanque de volumen entre 100 y 500 litros con una razón de altura/diámetro entre 1 y 5.

### 1.3 Hipótesis

Existen modelos de simulación de estanque estratificados basados en el método CFD que no se consideran el efecto de conducción térmica de la pared, utilizando como condición de borde una pared adiabática (Yaïci et al., 2013) y otros estudios en que sí se considera la conducción térmica de la pared y la transferencia de calor con el ambiente, como en los estudios (Fan & Furbo, 2012) y (Zachár et al., 2003). En otro estudio desarrollado por (Hoffmann et al., 2016) a través de un modelo unidimensional semi-empírico se concluye que el efecto de la conducción térmica en la pared no afecta de manera significativa la estratificación. En conclusión, no existe claridad en como afecta la conducción axial y radial de la pared del estanque sobre la estratificación. Es por esto que se plantea la siguiente hipótesis: “El efecto de la conducción térmica de la pared afecta la estratificación de un estanque de almacenamiento de agua caliente”.

### 1.4 Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Desarrollar un modelo de simulación de un estanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria.
- Comparar los resultados de la simulación con resultados experimentales.
- Evaluar el efecto de las condiciones de conducción de la pared sobre la estratificación del agua en el estanque.
- Analizar los contornos de temperaturas y de velocidades para justificar la causa efecto de la estratificación del agua.

### 1.5 Metodología de trabajo

Para llevar a cabo este trabajo se debe hacer una revisión bibliográfica sobre los sistemas solares y la importancia del estanque de acumulación de agua caliente. Identificar y describir los modelos de simulación existentes, tanto los modelos semi-empíricos unidimensionales como los modelos basados en el método CFD. Posteriormente se debe describir el sistema utilizado para validar su modelo de simulación, realizar el modelo geométrico, el mallado y el modelo físico del problema, destacando los aspectos particulares de la simulación a realizar. Se debe proponer una serie de simulaciones para responder a los objetivos planteados y a la contribución que pretende realizar el trabajo. Finalmente, se deben realizar las simulaciones y analizar los resultados.

Para ello se modela la geometría del estanque en 3D, y se realiza un mallado de modo que la calidad de las celdas sea suficientemente aceptable y que no requieran un procesamiento computacional elevado (convergencia de grillas). Además, se definen en

algunas caras las condiciones de borde apropiadas, como flujos de entrada y salida, paredes que confinan el fluido (agua) y entre otros.

Se utiliza el software ANSYS FLUENT realizando las siguientes actividades:

- Ajustar la escala del volumen (unidades de volumen a metros cúbicos).
- Definir como régimen transiente.
- Escoger los modelos (en este caso, modelo de energía y algún tipo de turbulencia).
- Definir el fluido (agua en el volumen de control) y los materiales (en las paredes definidas como condición de borde pared).
- Caracterizar los flujos de entrada (dirección, magnitud, temperatura, etc.) y las características de la pared (temperatura exterior, coeficiente convectivo, etc.).
- Definir monitoreo de solución y criterios de convergencia.

Se hace la simulación en régimen transitorio hasta que los resultados converjan para comparar con los resultados experimentales de algún ensayo realizado previamente, con el fin de validar el modelo. Posteriormente, se realiza un análisis del efecto de las condiciones de la pared comparando con los resultados experimentales para validar la metodología. Los casos a estudiar son los siguientes:

- Sólo el volumen del fluido con condición de borde adiabática.
- Fluido y pared con condición de borde adiabática..
- Fluido, pared y aislante con condición de borde adiabática.
- Fluido, pared y aislante con transferencia de calor al ambiente.

## **1.6 Alcances**

Los alcances que se espera obtener durante la tesis son:

- Comparar los resultados obtenidos del método CFD con las mediciones de ensayo.
- Comparar el fenómeno de estratificación mediante el método CFD sobre el efecto de la pared.
- Evaluar la estratificación mediante análisis de contornos de temperaturas y de velocidades.



## CAPITULO 2

### Marco teórico

#### 2.1 Sistemas solares

Los sistemas solares térmicos (SST) son sistemas que transforman la energía gratuita proveniente del sol en forma de radiación a energía térmica acumulada en agua caliente que luego se emplea en conjunto con un sistema auxiliar para satisfacer la demanda de Agua Caliente Sanitaria (ACS) de una vivienda.

Un SST que produce ACS se compone de tres subsistemas como se muestra la Figura 1: captación, acumulación y sistema auxiliar.

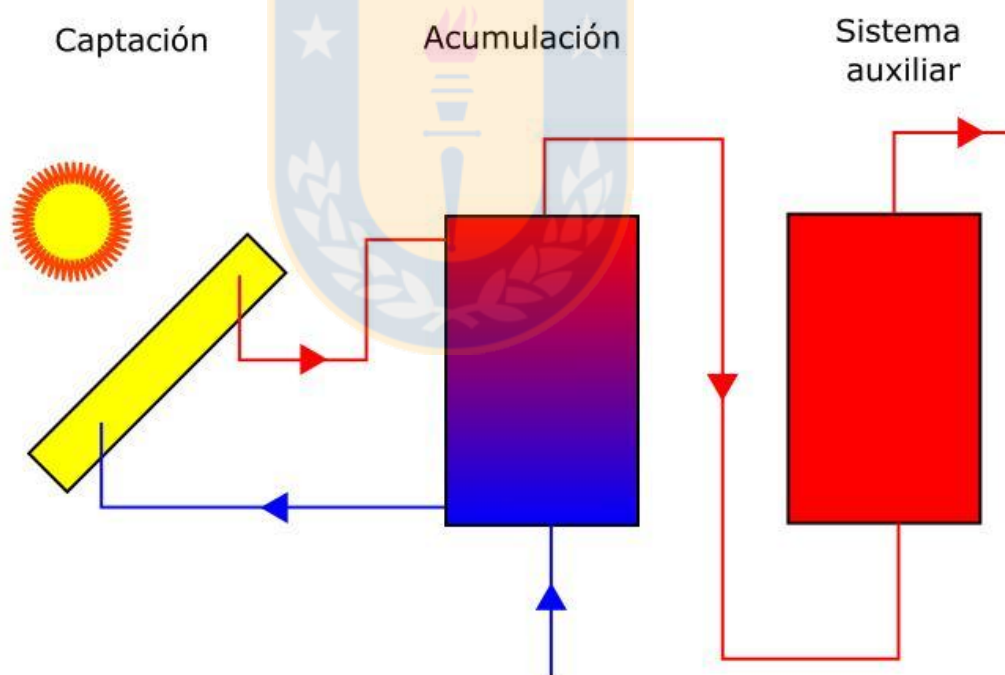


Figura 1. Esquema simplificado de un SST (Fuente: Elaboración propia).

La energía proveniente del sol es captada por colectores solares, siendo posteriormente transferida a un fluido de trabajo (ya sea agua pura o mezcla agua-glicol) y posteriormente almacenada en un estanque de acumulación, donde se transfiere calor con el agua de consumo (puede ser por contacto directo o indirecto, dependiendo del

fluido de trabajo). El fluido de trabajo debe ser impulsado por una bomba, para compensar las pérdidas de carga del sistema.

En el caso particular de este estudio, el análisis se centrará en la fase de “acumulación”, donde se estudiará uno de los fenómenos más importantes que permite tomar provecho de manera eficiente de este tipo de energía: la estratificación.

La estratificación es el fenómeno en el cual el agua se distribuye según su temperatura, es decir, es el causante del gradiente vertical de temperatura debido a distintas densidades de agua, donde el agua más caliente tiende a subir por empuje o flotación y la más fría a bajar por el peso propio o gravedad. Entre las zonas caliente y fría hay una zona térmica que hace mantener el gradiente de temperatura. Esta zona se denomina termoclina. En la Figura 2 se muestra una clasificación de la estratificación según el grado de uniformidad (Haller et al., 2009).

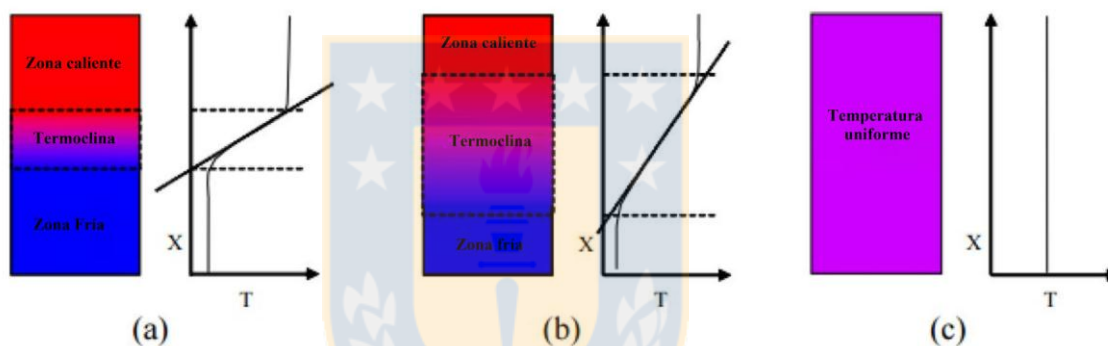


Figura 2. Diferentes grados de estratificación dentro de un tanque de almacenamiento con la misma cantidad de calor almacenado (Haller et al., 2009); (a) muy estratificada, (b) moderadamente estratificado y (c) completamente mezclada, no estratificada.

Este fenómeno natural es aprovechado para extraer el agua hacia el consumo desde la zona donde esta está más caliente.

## 2.2 Descripción de estanque de almacenamiento

La función de los acumuladores de agua caliente sanitaria es almacenar la energía recolectada por los colectores solares para así gestionarla de manera más eficiente. En este proceso interactúan dos fluidos en dos formas distintas.

- Contacto directo: Dos fluidos transfieren calor y masa. La restricción en el uso de este tipo es que los dos fluidos deben compartir las mismas propiedades. En el caso de los sistemas solares térmicos, debe ser agua en ambos flujos.
- Contacto indirecto: Dos fluidos transfieren sólo energía y para ello se dispone un intercambiador de calor en su interior. En este caso para mejorar la eficiencia de transferencia de calor, el fluido de trabajo puede ser una mezcla de agua-glicol (para evitar la congelación), etc.

En la Tabla 1 se muestran algunas ventajas y desventajas de los dos tipos de estanques.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los dos tipos de estanques (Fuente: Elaboración propia).

<b>Tipos de estanques</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Contacto directo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es más simple y relativamente barato.</li> <li>- Instalación fácil.</li> <li>- Transferencia de calor eficiente debido a la mezcla entre flujos.</li> <li>- Se integra fácilmente con sistemas existentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sólo puede utilizarse agua como fluido de trabajo.</li> <li>- No existe en tamaños pequeños en forma comercial, sólo existen a lo menos de 500 litros aproximadamente (basado en la disponibilidad de los estanques autorizados según la SEC).</li> <li>- Se limitan los flujos debido a la turbulencia, ya que a mayor flujo produce mayor ruptura a la estratificación del agua.</li> </ul>
<b>Contacto indirecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Debido a que no es de mezcla, se pueden usar otros fluidos para evitar la congelación.</li> <li>- Existen de tamaños pequeños (por ejemplo para una casa unifamiliar de 4 personas).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Debido a su complejidad es más caro.</li> <li>- Pueden aparecer respuestas oscilatorias del sistema, reduciendo la ganancia total de éste.</li> <li>- Se pierde eficiencia debido a la diferencia de temperatura que se requiere para transferir calor al estanque.</li> </ul>

Tomando en consideración que los acumuladores de agua generan el efecto de la estratificación de agua, el fluido de trabajo o el que capta y transporta energía debe entrar por la parte superior (entrando caliente) y salir por la parte inferior (saliendo frío) y el fluido de consumo (agua) realiza el trayecto en forma inversa, es decir, entrando frío por la parte inferior y saliendo caliente por la parte superior, ya que, como se explicó anteriormente, el fluido caliente se encuentra en la zona superior y el fluido frío en la zona inferior.

También se debe tomar en cuenta que siempre habrá pérdidas de calor, como por ejemplo, en el peor de los casos, en los periodos de noche y de frío. Para minimizar esta pérdida los estanques deben estar revestidos por aislantes adecuados. Además, se debe determinar con algún criterio un espesor óptimo, considerando aspectos de funcionamiento y aspectos económicos.

Existen criterios que fueron normalizados a nivel mundial, como las normas alemanas DIN 4708 y 4753. La norma DIN 4708, de instalaciones de sistemas de calefacción de agua caliente y la norma DIN 4753, de instalaciones de calentadores de agua y de sistemas termales para aguas de consumo, potable y servidas y fines industriales.

Según el manual práctico del técnico solar “Sistemas solares térmicos de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares” (Ministerio de energía, 2013), se recomienda que la razón entre el volumen total del sistema de acumulación y el área de captación, conocida como acumulación específica, debe estar dada por:

$$40[\text{lt} / \text{m}^2] < V_{TK} / A_{col} < 180[\text{lt} / \text{m}^2] \text{ (Obligatorio)} \quad (1)$$

$$60[\text{lt} / \text{m}^2] < V_{TK} / A_{col} < 120[\text{lt} / \text{m}^2] \text{ (Recomendado)} \quad (2)$$

En el mismo manual también se indica que, en general, el sistema de acumulación preferentemente debe estar constituido por un acumulador único, de configuración vertical y situado en el interior del edificio, por las ventajas que esta disposición ofrece:

- El acumulador único permite tener la menor superficie de pérdidas térmicas para un determinado volumen acumulado.
- La configuración vertical favorece la estratificación del agua caliente en su interior.
- La ubicación en espacios interiores mejora su durabilidad por el resguardo frente a acciones climatológicas y reduce sensiblemente las pérdidas térmicas.

Para el caso de los estanques de contacto indirecto, el dimensionado del intercambiador de calor incorporado al acumulador debe quedar definido por el área útil de intercambio situada en la mitad inferior del acumulador que, en relación con el área total de captación, debe cumplir siempre la siguiente relación:

$$A_{IC} > 0,20A_{col} \quad (3)$$

## CAPITULO 3

### Descripción del banco de ensayos y de los resultados experimentales

#### 3.1 Descripción general

El sistema que se toma de referencia es el banco de ensayo ubicado en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción (Saelzer, 2015). La Figura 3 muestra el esquema del sistema.

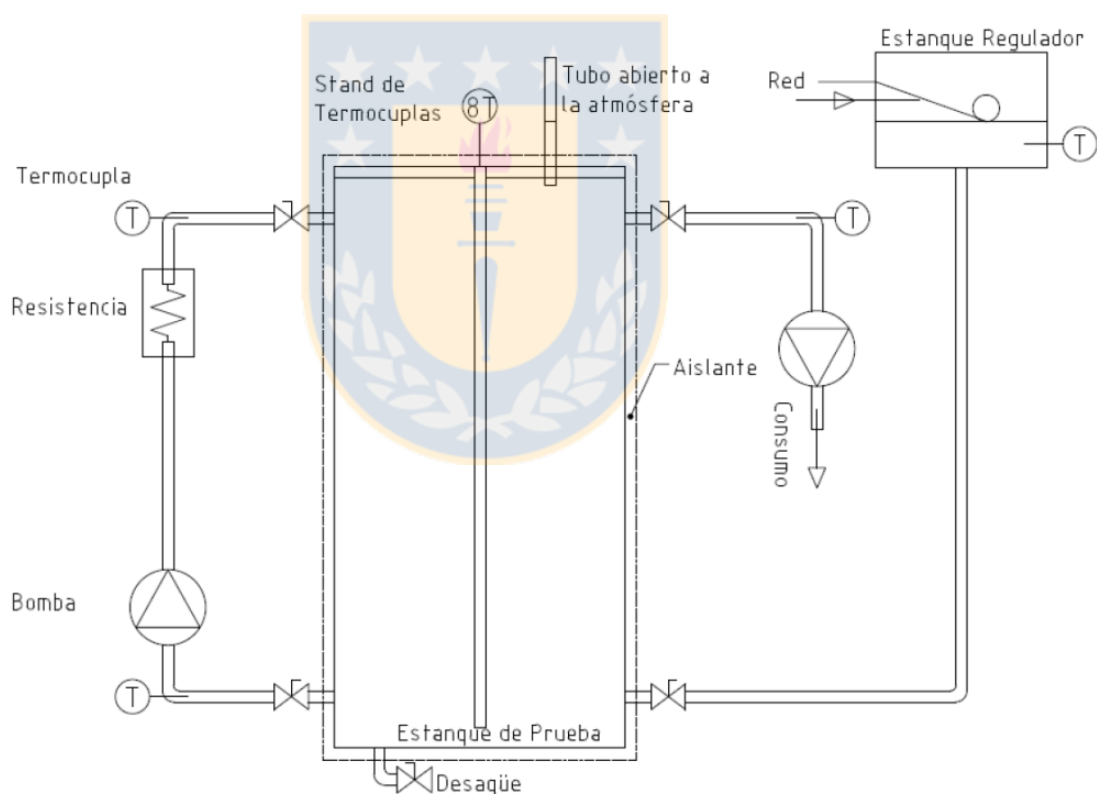


Figura 3. Esquema del banco de ensayos (Saelzer, 2015).

El agua de la red llega a un estanque regulador, el cual mediante un control mecánico del nivel del agua, compuesto por una válvula con flotador vertical, admite el paso del fluido al estanque. Como el agua de la red está fría, no se requiere de aislación en esta zona. Las cañerías utilizadas en el banco de ensayo son de cobre con un diámetro

nominal de ½ pulgada y la cañería de admisión entre ambos estanques es de PVC y tiene un diámetro de 1 pulgada. El estanque a utilizar es de contacto directo, es decir, no tiene un intercambiador de calor. Se trata de un cilindro de acero con paredes de 1 [mm] de espesor, 40 pulgadas de alto y 20 pulgadas de diámetro, el cual está aislado con una capa de lana de vidrio de 50 [mm] de espesor, la cual se asume que tiene una conductividad térmica de 0,036 [W/mK]. Todo el perímetro exterior del aislante se cubre con una plancha de acero galvanizado para reducir las pérdidas por radiación infrarroja y también tiene como función cubrir la lana de vidrio como elemento de sujeción y para evitar la exposición con la piel. El estanque tiene 4 conexiones laterales, 2 para los circuitos de calentamiento y 2 para el consumo. Cada una de estas conexiones tiene una válvula de bola para cortar el paso del fluido y aislar los circuitos en caso de ser necesario. En la parte inferior tiene una línea que va directamente al desagüe para poder vaciar el estanque rápidamente, la cual igualmente posee una válvula de bola. Ambas cañerías superiores están a 96 [cm] medidas desde la parte inferior del estanque. La entrada de agua de la red está a una altura de 9 [cm] y la que va al circuito de calentamiento está a 2 [cm] del fondo.

La tapa superior del estanque se sella con un disco metálico de 2 [mm] de espesor soldado al manto del cilindro. El estanque está abierto a la atmósfera mediante una tubería de ½ pulgada de 120 [cm] de alto soldada en la tapa superior de éste. En la parte central de la tapa superior del estanque se ubica una placa cuadrada removible, la cual se encuentra apernada a la tapa sellando herméticamente el estanque con un anillo de goma que cumple un rol de empaquetadura. Esta placa removible sirve como un soporte para las termocuplas que miden la temperatura del agua dentro del estanque. En el centro de la placa se suelda una cañería de cobre de ¾ de pulgada que llega hasta el fondo del estanque, pero sin tocar la tapa inferior para evitar efectos de conducción. Dentro de esta cañería pasan las 8 termocuplas cuyas terminaciones sobresalen por pequeños agujeros igualmente espaciados verticalmente a lo largo del estanque, los cuales son sellados con silicona una vez ubicadas las termocuplas. La configuración anterior sirve para poder manipular las termocuplas minimizando el riesgo de dañarlas al momento de introducir o retirar el soporte.

Para el sistema completo se utilizan un total de 14 termocuplas, 8 en la parte central del estanque, 4 en la entrada y salida de los circuitos de calentamiento y consumo y se utilizan dos más para medir la temperatura del aire ambiente.

En el circuito de calentamiento se utilizan cañerías de cobre de ½ pulgada de diámetro y el fluido es impulsado por una bomba pequeña marca PLASET, la que tiene las especificaciones indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificación técnica de la bomba PLASET (Fuente: Elaboración propia).

<b>Modelo</b>	50784
<b>Voltaje</b>	220/240 [V] AC
<b>Frecuencia</b>	50 [Hz]
<b>Potencia</b>	34 [W]

Para el circuito de consumo se utiliza una bomba de mayor capacidad, ya que el caudal es mayor. En este circuito se utiliza una bomba centrífuga Pedrollo con las características indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificación técnica de la bomba Pedrollo (Fuente: Elaboración propia).

<b>Modelo</b>	PKm 60
<b>Caudal de diseño</b>	0,125 [lt/min]
<b>Altura de diseño</b>	7,6 [m]
<b>Altura máxima</b>	40 [m]
<b>Altura mínima</b>	5 [m]
<b>Temperatura máxima</b>	60 [°C]
<b>Voltaje</b>	220/230 [V] AC
<b>Frecuencia</b>	50 [Hz]
<b>RPM</b>	2900
<b>Potencia nominal</b>	0.5 [HP]
<b>Corriente nominal</b>	2,5 [A]
<b>Potencia máxima</b>	550 [W]

Para reducir el caudal del circuito de consumo, sin correr el riesgo de generar cavitación en la bomba, se utiliza una recirculación, la cual se regula con una válvula de bola.

Como para el estudio se desea analizar el comportamiento del agua dentro del estanque, en el circuito de calentamiento se reemplaza el colector solar por una resistencia eléctrica con una potencia de calentamiento de 1850 [W]. A pesar de que la potencia efectiva de un colector varía dependiendo de la radiación solar incidente y el ángulo de inclinación, para el presente estudio se utiliza una potencia eléctrica constante. Lo anterior se debe a que interesa analizar el comportamiento térmico del agua caliente dentro del estanque acumulador con la menor cantidad de fluctuaciones externas, por lo

que agregar una condición variable adicional hará que sea más difícil apreciar la magnitud real de la transferencia de calor y masa que ocurre en el interior del sistema.

La resistencia se ubica dentro de un compartimiento metálico cilíndrico aislado con lana de vidrio y recubierto con acero galvanizado, de igual forma que el estanque. Para evitar filtraciones de agua, los orificios se sellan completamente con silicona.

## **3.2 Mediciones**

### **3.2.1 Temperatura**

Las termocuplas que mejor se ajustan al rango de temperatura que estará sometida el agua del estanque son del tipo T, las cuales tienen un error de medición inferior a  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Estas termocuplas tipo T son de calibre 20, con aislación FEP (del inglés Fluorinated Ethylene Propylene) tanto al interior como al exterior, las cuales aceptan un rango de temperaturas entre  $-200$  a  $204^{\circ}\text{C}$ .

Las termocuplas instaladas dentro del estanque están en contacto directo con el agua, lo que minimiza los errores debido a la inercia del sensor mismo. Para el caso de las temperaturas del agua de ingreso y salida de los circuitos de calentamiento y consumo, estas son instaladas dentro de una vaina metálica instalada en un codo y se extiende en al menos 10 cm dentro de la cañería.

La temperatura del aire ambiente se registra utilizando dos termocuplas tipo T en las cercanías del banco de ensayos, pero no tan cerca del estanque para que no sean afectadas por el calor que desprende éste por convección natural. Para minimizar los efectos de radiación infrarroja en el registro de las temperaturas se apantallaron ambas termocuplas con un cilindro recubierto de papel aluminio dejando un orificio por el cual pueda ingresar el aire.

### **3.2.2 Caudal**

Para medir el caudal que se extrae del circuito de consumo se utiliza un recipiente graduado cada 1 litro, con una capacidad máxima de 20 litros, en donde se cronometra el tiempo de llenado. Para obtener el caudal que pasa por el circuito se divide el volumen alcanzado del recipiente por el tiempo que tardó en llenarse, repitiendo el proceso varias veces y promediando los valores para obtener un resultado final. Lo anterior no es aplicable para el circuito de calentamiento, puesto que es un circuito cerrado. Para este caso se utiliza un balance de energía en la resistencia eléctrica para determinar el flujo másico que pasa a través del circuito.



### 3.3 Resultados experimentales

En la Figura 4 se muestran los resultados de un ensayo. Estos datos son extraídos sólo para los primeros 4800 [s] para validar la metodología del trabajo utilizada en este estudio. En este ensayo, y dado que el flujo de consumo es inferior al flujo de calentamiento, se observa un desplazamiento de la termoclina desde la parte superior hacia la parte inferior del estanque. Se observa una baja temperatura en la zona inferior, sin un aumento significativo en el tiempo. En esta zona el fluido frío no se mezcla con el fluido caliente como en las zonas superiores.

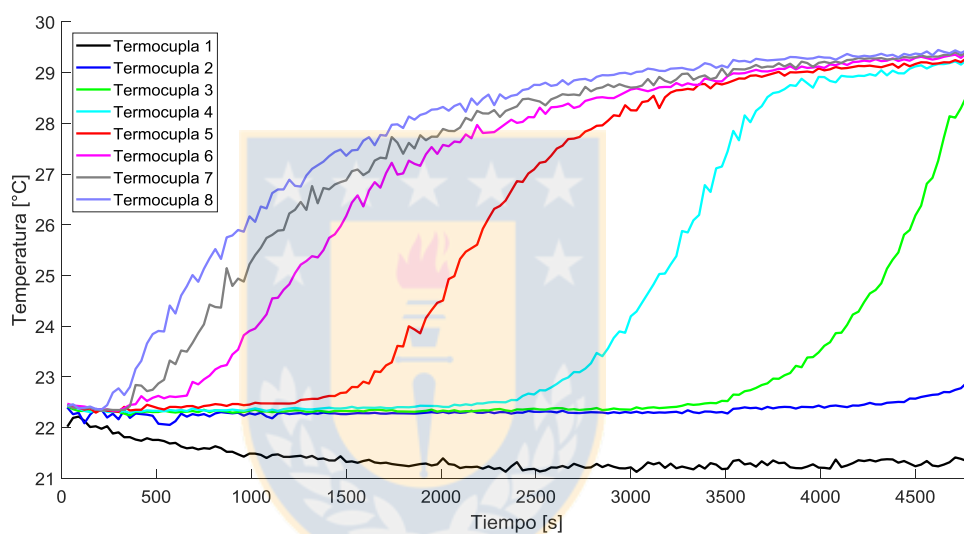


Figura 4. Resultados experimentales de un ensayo a validar (Fuente: Elaboración propia).

En la zona inferior, no se observa una variación significativa de la temperatura, lo cual se puede atribuir a una mezcla más significativa en esta zona debido al mayor flujo de agua fría que ingresa por esta parte. Se observa además una oscilación en las mediciones de las termocuplas, lo que se puede atribuir a vibraciones inducidas por la bomba que está instalada sobre la misma estructura del estanque.

## CAPITULO 4

### Modelo geométrico y mallado

#### 4.1 Dimensiones del estanque

La metodología usada para validar el modelo numérico realizado en esta Tesis es aplicada en el estanque de contacto directo explicado en el capítulo 3. Para esto se genera el modelo geométrico como se muestra en la Figura 5.

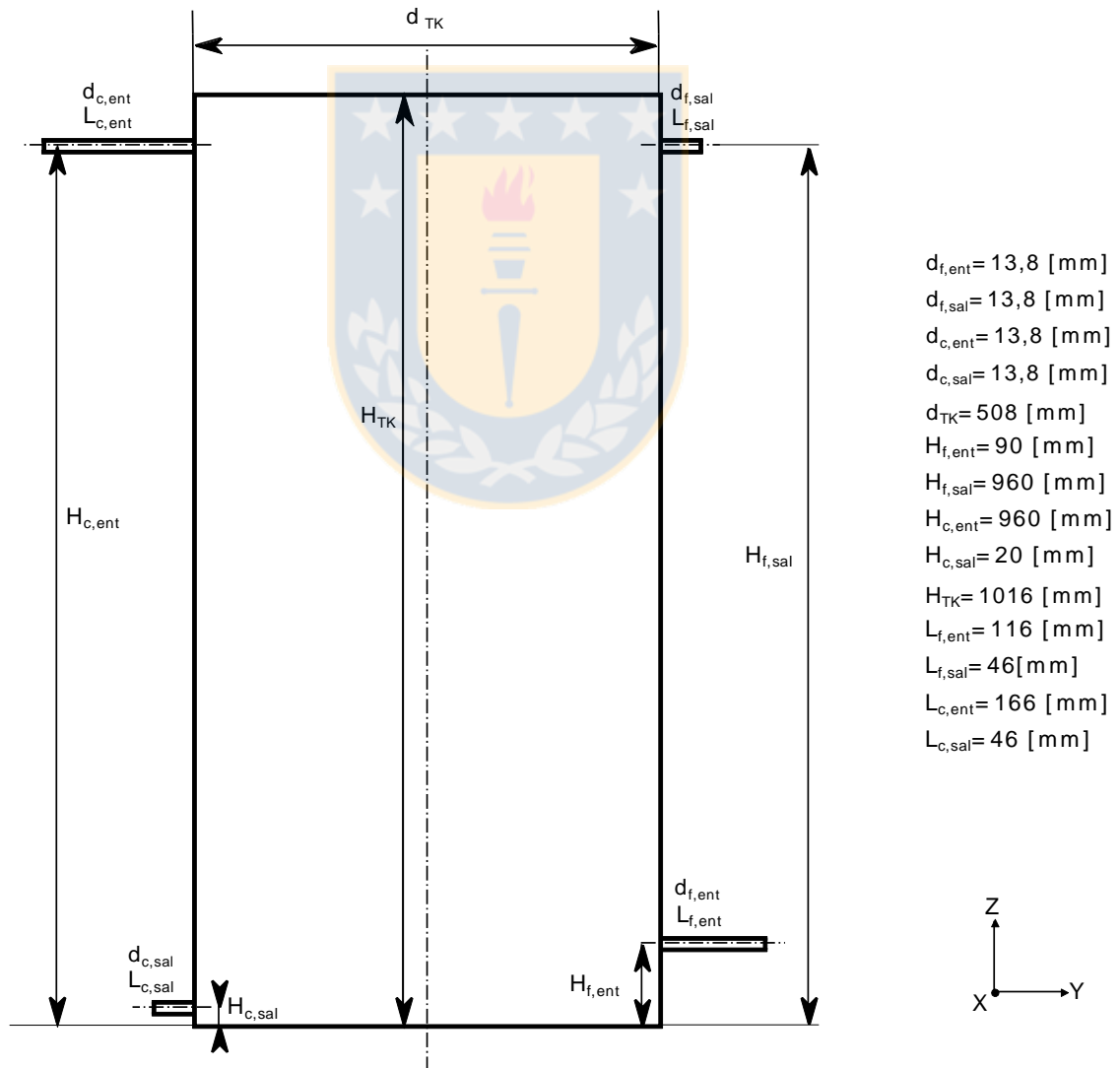


Figura 5. Modelo geométrico del estanque (Fuente: Elaboración propia).

El manto del cilindro se encuentra unido con 4 tubos que corresponden a:

- Entrada del agua del circuito de calentamiento (izquierda superior).
- Salida del agua al proceso de calentamiento (izquierda inferior).
- Entrada del agua de la red (derecha inferior).
- Salida del agua al consumo (derecha superior).

Se modelan dichos tubos para que los flujos entren con un perfil de velocidad completamente desarrollado hacia el estanque. En la Figura 5 se indica en forma detallada el modelo geométrico con las cotas indicadas.

Con respecto al plano YZ se hace una simetría. Es decir, se modela sólo la mitad del estanque para reducir la cantidad de grillas, como se realiza en el estudio (Yaïci et al., 2013). Esta simplificación es válida, ya que en condiciones de funcionamiento del ensayo los efectos de la turbulencia son mínimos y además las líneas de flujos, bajo estas condiciones, son simétricas.

#### 4.2 Mallado del estanque

Se hace el mallado compuesto en grillas de forma de hexaedros, como se muestra en la Figura 6.

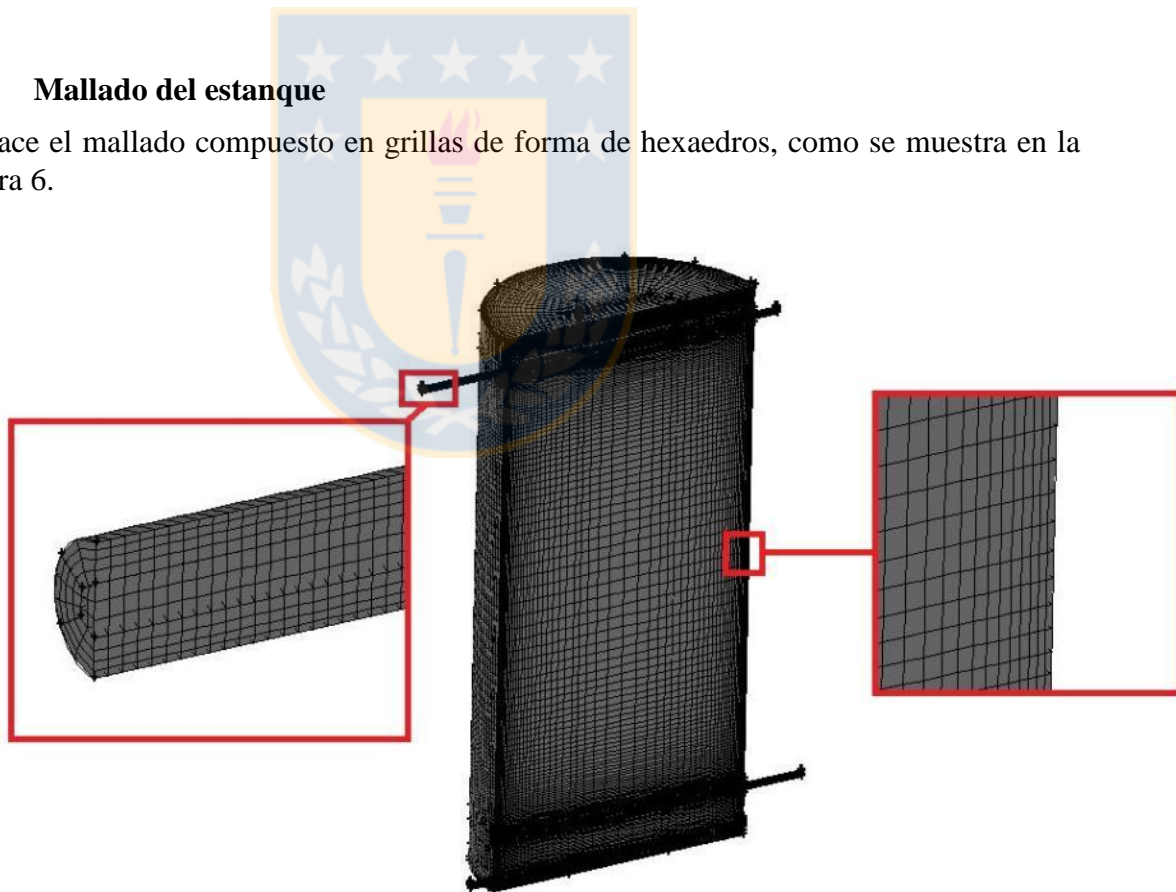


Figura 6. Mallado del estanque (Fuente: Elaboración propia).

En la vecindad de las paredes (en los tubos y el estanque) se hace el mallado en forma más fina, debido a que estas zonas tienen mayores esfuerzos de cizalle, los cuales generan un cambio importante en las velocidades del escurrimiento y además para tener una mejor calidad de los resultados de transferencia de calor en la interfase sólido-fluido. Para ello se debe cumplir que, de acuerdo al modelo de turbulencia seleccionado que se indicará más adelante,  $y^+$  debe ser menor o igual que 1.

Sin embargo, según el estudio (Haller et al., 2009), la variación de la temperatura horizontal es despreciable. Por lo tanto, se hace un mallado más basto en esa dirección para disminuir la cantidad de grillas, pero cabe mencionar que también debe tener una cantidad mínima de tal forma de que el cambio de longitud entre grillas vecinas no debe superar el 20% para lograr una transición suave entre elementos.

Para afinar los resultados se realiza el proceso de convergencia de grilla, modelando 3 tipos de mallados. En la Tabla 4 se indica la cantidad de elementos y nodos que contiene cada mallado, en la Tabla 5 se muestran la calidad ortogonal mínima y razón de aspecto máximo para cada mallado y en las Tablas 6 y 7 algunas estadísticas, donde se describen las distribuciones de las celdas según los siguientes criterios: distorsión angular y razón de aspecto.

Tabla 4. Cantidad de elementos y nodos para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).

	<b>Mallado 1</b>		<b>Mallado 2</b>		<b>Mallado 3</b>	
	<b>N° Elementos</b>	<b>N° Nodos</b>	<b>N° Elementos</b>	<b>N° Nodos</b>	<b>N° Elementos</b>	<b>N° Nodos</b>
<b>Fluido</b>	323412	-----	595128	-----	1102554	-----
<b>Capa de acero</b>	14098	-----	42700	-----	97602	-----
<b>Aislante</b>	323960	-----	589776	-----	1088254	-----
<b>Total</b>	661470	720095	1227604	1316021	2288410	2421796

Tabla 5. Calidad ortogonal mínima y razón de aspecto máximo para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).

	<b>Mallado 1</b>	<b>Mallado 2</b>	<b>Mallado 3</b>
<b>Calidad ortogonal mínima</b>	0,1010	0,0730	0,0458
<b>Razón de aspecto máximo</b>	103	138	183

De las tablas mencionadas, los 3 mallados entregan una buena distribución de calidad, donde sobre el 70% de los elementos entregan una excelente calidad con una distorsión

angular menor a 0,1 y una razón de aspecto menor a 20, un valor recomendado para favorecer la convergencia de los resultados según el manual de ANSYS (Fluent, 2013).

Tabla 6. Distribución de celdas del modelo según la distorsión angular para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).

Mínimo	Máximo	Mallado 1		Mallado 2		Mallado 3	
		N° Grillas	%	N° Grillas	%	N° Grillas	%
0	0,1	480853	72,69	910060	74,13	1721774	75,24
0,1	0,2	73396	11,10	118268	9,63	231429	10,11
0,2	0,3	40775	6,16	82310	6,70	128348	5,61
0,3	0,4	39772	6,01	65234	5,31	113963	4,98
0,4	0,5	9347	1,41	18444	1,50	30897	1,35
0,5	0,6	3385	0,51	6080	0,50	9029	0,39
0,6	0,7	4181	0,63	6063	0,49	9684	0,42
0,7	0,8	7611	1,15	16915	1,38	30693	1,34
0,8	0,9	1629	0,25	2590	0,21	8005	0,35
0,9	1	521	0,08	1640	0,13	4588	0,20
0	1	661470	100	1227604	100	2288410	100

Tabla 7. Distribución de celdas del modelo según la razón de aspecto para cada mallado (Fuente: Elaboración propia).

Mallado 1				Mallado 2				Mallado 3			
Mínimo	Máximo	N° Grillas	%	Mínimo	Máximo	N° Grillas	%	Mínimo	Máximo	N° Grillas	%
0	11	477423	72,18	0	14	959932	78,20	0	19	1909473	83,44
11	22	130551	19,74	14	28	177621	14,47	19	38	212480	9,29
22	33	32366	4,89	28	42	46964	3,83	38	57	96465	4,22
33	44	11280	1,71	42	56	25344	2,06	57	76	47268	2,07
44	55	5331	0,81	56	70	11345	0,92	76	95	14856	0,65
55	66	2478	0,37	70	84	3922	0,32	95	114	4459	0,19
66	77	1297	0,20	84	98	1623	0,13	114	133	1904	0,08
77	88	512	0,08	98	112	627	0,05	133	152	1084	0,05
88	99	220	0,03	112	126	204	0,02	152	171	367	0,02
99	110	12	0,00	126	140	22	0,00	171	190	54	0,00
0	110	661470	100	0	140	1227604	100	0	190	2288410	100

## CAPITULO 5

### Modelo físico

#### 5.1 Ecuaciones que gobiernan el modelo

Las ecuaciones que gobiernan el modelo del fluido son las ecuaciones de continuidad, conservación de momentum y conservación de la energía, es decir:

- Continuidad (1 ecuación):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (4)$$

- Conservación del momentum (3 ecuaciones):

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + (\rho u \cdot \nabla) u = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 u \quad (5)$$

Donde:

$\rho \frac{\partial u}{\partial t}$  : Variación de velocidad local.

$(\rho u \cdot \nabla) u$  : Variación de velocidad convectiva.

$\rho g$  : Fuerza de cuerpo (peso). La aceleración de gravedad se considera constante y los valores de las componentes son (según las coordenadas de la Figura 5):

$$g_x = 0 \left[ \frac{m}{s^2} \right]; g_y = 0 \left[ \frac{m}{s^2} \right]; g_z = -9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right].$$

$\nabla P$  : Presión estática a la que está sometido.

$\mu \nabla^2 u$  : Fuerza superficial. El tensor de esfuerzos es reemplazado con la relación velocidad de deformación-esfuerzo (reología).

- Conservación de la energía (1 ecuación):

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (6)$$

Donde:

$\frac{\partial E}{\partial t}$  : Variación de energía local.

$\rho c_p u \cdot \nabla T$  : Advección.

$\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$  : Difusión

Se utiliza el modelo de turbulencia k- $\omega$  estándar, ya que las velocidades del flujo en el estanque son bajas, donde, por continuidad, las velocidades se reducen en forma considerable después de salir y antes de entrar a los ductos. Por lo tanto, el número de Reynolds en general es bajo lo que justifica el modelo de turbulencia seleccionado. Por lo tanto, este es un problema que no es de “turbulencia pura”. Este modelo consta de 2 ecuaciones adicionales:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial X_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (8)$$

Más información en forma detallada se encuentra en el manual (Fluent, 2013).

Para modelar las capas de sólido, se agrega una ecuación relacionada al balance de energía (considerando que las capas son fijas en posición):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \int c dT \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h \quad (9)$$

Donde:

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \int c dT)$  : Variación de energía local. Se considera sólo sensible.

$\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$  : Flujo de calor por conducción.

$S_h$  : Flujo de calor adicional. Sólo se considera en el caso no adiabático donde se impone sólo en la parte exterior (interacción con el ambiente).

## 5.2 Condiciones de borde

Como se muestra en la Tabla 8 se definen 7 condiciones de borde.

Tabla 8. Condiciones de borde (Fuente: Elaboración propia).

<b>Cara</b>	<b>Tipo de condición</b>
Entrada desde colector solar	MASS FLOW INLET
Salida hacia colector solar	PRESSURE OUTLET
Entrada consumo	MASS FLOW INLET
Salida consumo	PRESSURE OUTLET
Paredes del estanque	WALL
Paredes de los tubos	WALL (Adiabático)
Sección del corte (Plano YZ)	SYMMETRY

## 5.3 Descripción del fluido (agua)

Se considera que todas las propiedades del agua (densidad, conductividad, viscosidad y calor específico) dependen de la temperatura (en grados Kelvin) en forma polinomial según las siguientes ecuaciones:

$$\rho_w = 311,194 + 6,08944T - 0,0168425T^2 + 0,0000138643T^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (10)$$

$$\lambda_w = -1,12768 + 0,0107242T - 0,0000194542T^2 + 9,60229 * 10^{-9}T^3 \text{ [W/mK]} \quad (11)$$

$$\mu_w = 0,0899805 - 0,000761022T + 0,00000216839T^2 - 2,07290 * 10^{-9}T^3 \text{ [Pa s]} \quad (12)$$

Estas funciones son obtenidas mediante el uso de software EES con las curvas que se indican en las Figuras 7, 8 y 9.



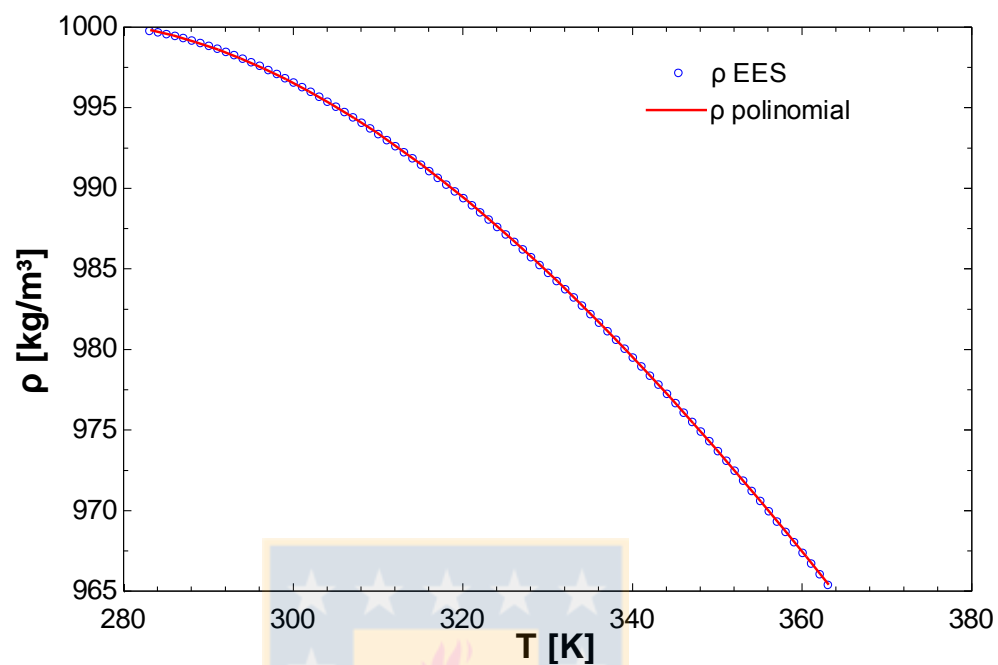


Figura 7. Densidad de agua en función de temperatura (Fuente: Elaboración propia).

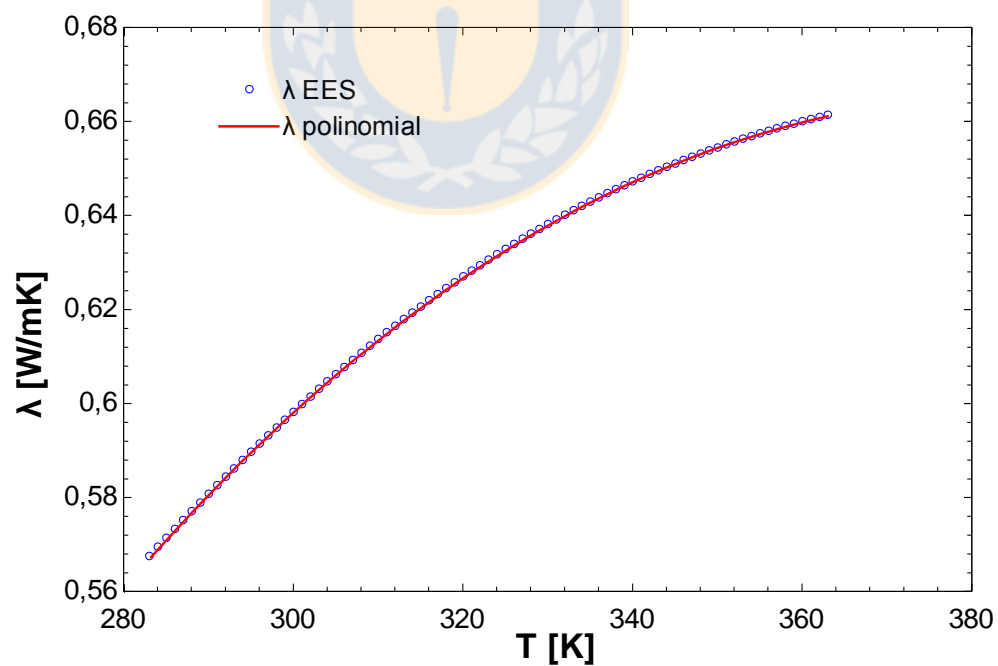


Figura 8. Conductividad de agua en función de temperatura (Fuente: Elaboración propia).

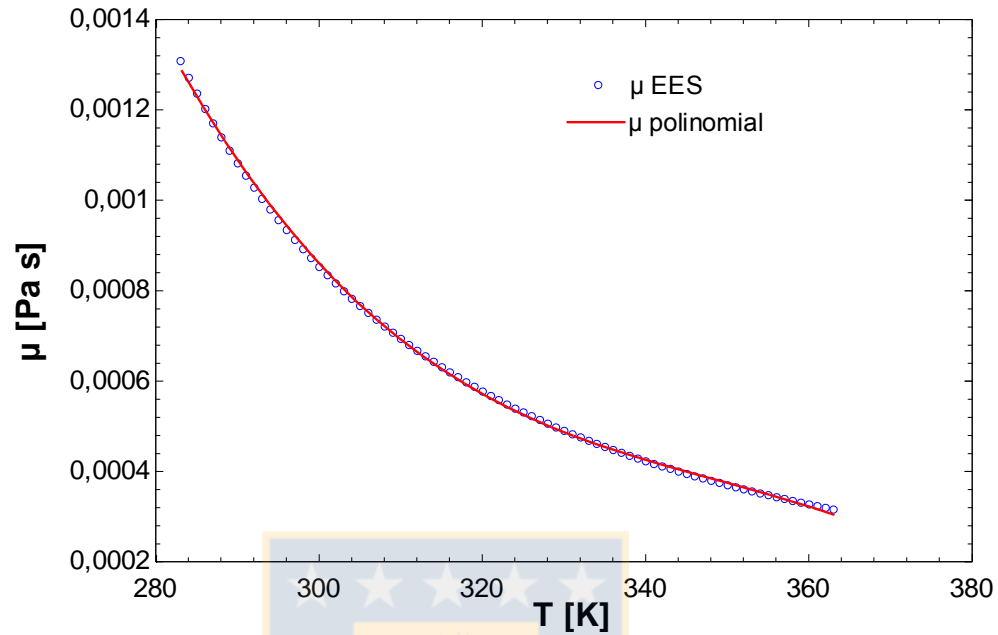


Figura 9. Viscosidad dinámica de agua en función de temperatura (Fuente: Elaboración propia).

El calor específico del agua se considera constante. El valor representativo es la media entre 10 y 90 [°C] con un valor de:

$$c_{p,w} = 4186 \left[ \frac{J}{kgK} \right] \quad (13)$$

#### 5.4 Descripción de la pared

La pared del estanque se compone de una capa interna de acero, una capa de aislante y una capa externa, como se muestra en la Figura 10.

En este estudio se desprecia la pared exterior debido a su bajo espesor. El coeficiente convectivo del aire exterior se calcula mediante una correlación de placa plana y se considera constante alrededor de todo el estanque.

La condición de borde en las paredes del estanque depende del caso de estudio, como se indica en la Tabla 9, considerando los siguientes casos de simulación:

- Caso 1: Sólo el volumen del fluido con condición de borde adiabática.
- Caso 2: Fluido y pared con condición de borde adiabática..
- Caso 3: Fluido, pared y aislante con condición de borde adiabática.
- Caso 4: Fluido, pared y aislante con transferencia de calor al ambiente.

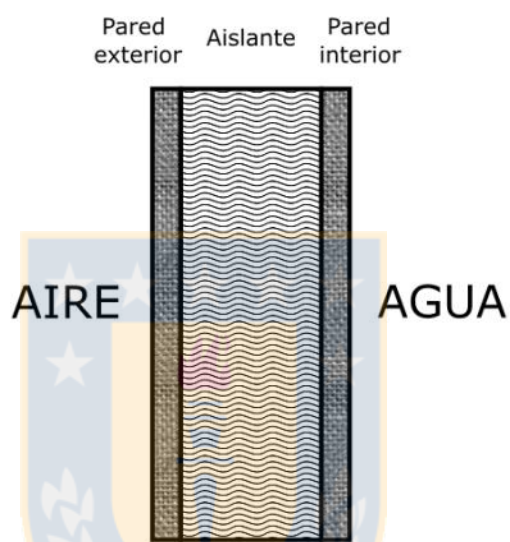


Figura 10. Composición de un estanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 9. Condición de borde pared para distintos casos de estudio (Fuente: Elaboración propia).

Casos	Modelo			Adiabático (Sí o No)
	Volumen del fluido	Capa interna de acero	Aislante	
1	X			Sí
2	X	X		Sí
3	X	X	X	Sí
4	X	X	X	No

En los casos en que se debe modelar la pared del estanque y el aislante se consideran las propiedades indicadas en la Tabla 10.

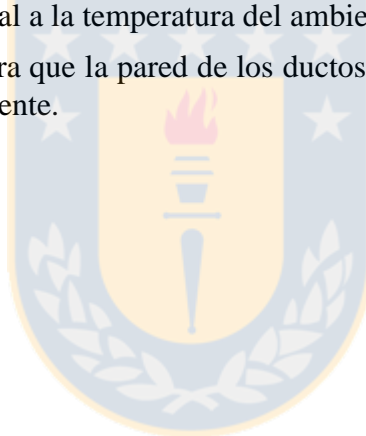
Tabla 10. Propiedades de las capas de sólidos (Fuente: Elaboración propia).

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/kgK]	$\lambda$ [W/mK]	$e$ [mm]
Capa de acero	8030	502,48	16,27	1
Aislante (Lana de vidrio)	150	670	0,036	50

Para el caso del modelo no adiabático (caso N°4), se transfiere calor con el ambiente por convección y por radiación. El coeficiente convectivo del aire se considera 6,0 [W/mK] (calculado por el memorista (Saelzer, 2015) mediante de una correlación de placa plana) y la capa externa es de cuerpo gris con un valor de emisividad de 0,28.

La pared se considera estacionaria y además que no existe velocidad relativa entre la pared y el fluido (“No slip”). Se considera también que la temperatura de las paredes que rodean al estanque es igual a la temperatura del ambiente exterior.

Por otro lado, se considera que la pared de los ductos es adiabática, es decir, que no hay pérdidas de calor al ambiente.



## CAPITULO 6

### Resultados de las simulaciones y validación de la metodología

En este capítulo se realiza una validación del modelado con los datos experimentales obtenidos por el memorista (Saelzer, 2015). Para ello se comparan los perfiles de temperatura en forma temporal para un caso particular con el método CFD.

#### 6.1 Descripción del ensayo realizado

A continuación, se valida la metodología descrita en las secciones 4 y 5 con uno de los cinco ensayos que se utilizará en este estudio. Este ensayo se compara con los resultados que entrega el método CFD mediante un gráfico de perfil de temperatura en función del tiempo para 8 alturas distintas donde se ubican las termocuplas verticalmente en el centro del estanque de ensayo, las que se miden cada 30 segundos. En la Tabla 11 se indica las alturas de cada termocupla.

Tabla 11. Ubicación vertical de termocuplas (Fuente: Elaboración propia).

Termocupla	1	2	3	4	5	6	7	8
Altura [mm]	56	186	316	446	576	706	836	966

Adicionalmente, se midieron también las temperaturas de entrada de agua caliente y fría al estanque y la temperatura ambiente. Estas variables se ingresan en el programa de simulación considerando una aproximación polinomial de modo que no supere el error que entrega cada termocupla (0,3 [°C]) mediante el uso de UDF (función definida por usuario). En algunos casos se hacen por tramos. En la sección de anexos se encuentra el ruterio que define las variables de entrada en función del tiempo.

## 6.2 Definición de las condiciones de entrada

Los caudales de calentamiento y de consumo son constantes dentro del intervalo de tiempo a validar y sus valores son de 2,8 [lt/min] y de 1,3 [lt/min] respectivamente. Además las temperaturas están definidas en forma polinomial según lo indicado en las Ecuaciones (14), (15) y (16).

$$T_{c,ent} = \begin{cases} 22,309 & , 0 \leq t < 270 \\ 389,773 - 4,504t + 0,0199024t^2 - 0,0000376179t^3 + 2,59675 * 10^{-8}t^4 & , 270 \leq t < 450 \\ 30,3378 + 0,00027563t - 2,62830 * 10^{-7}t^2 + 6,61023 * 10^{-11}t^3 - 4,93116 * 10^{-15}t^4 & , t \geq 450 \end{cases} \quad (14)$$

$$T_{f,ent} = 20,4588 - 0,0000929915t + 1,76502 * 10^{-8}t^2 - 7,33374 * 10^{-13}t^3 + 8,55578 * 10^{-18}t^4 \quad (15)$$

$$T_a = 20,0035 + 0,000147069t + 5,56657 * 10^{-9}t^2 - 2,98303 * 10^{-13}t^3 + 2,22582 * 10^{-18}t^4 \quad (16)$$

En las Figuras 11, 12, 13 se muestra la comparación entre las mediciones y la ley polinomial correspondiente. Las líneas punteadas indican las bandas de errores de  $\pm 0,3$  [°C] de las mediciones con termocuplas.

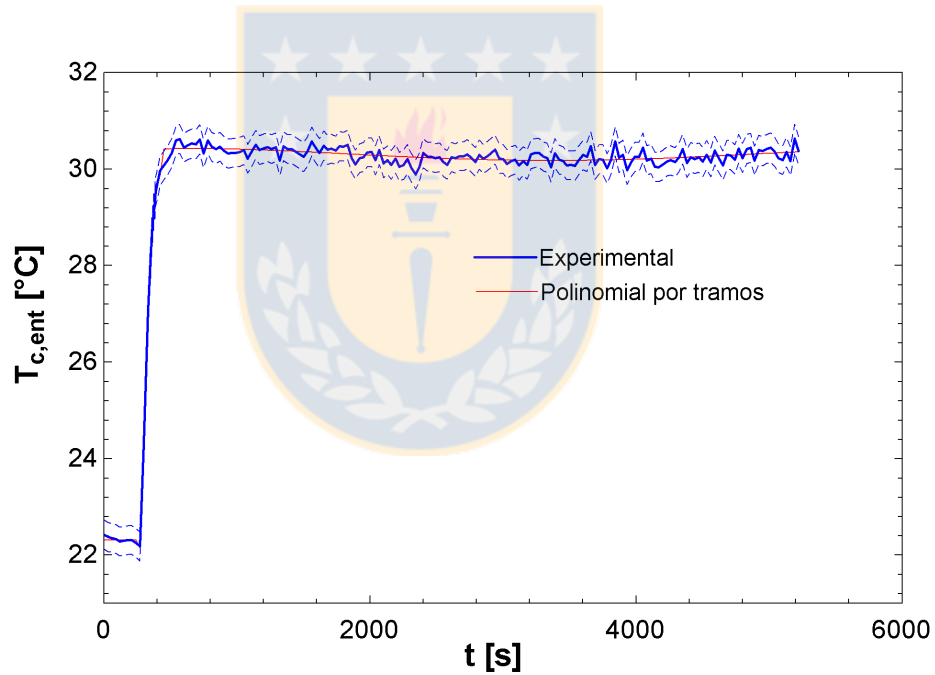


Figura 11. Temperatura entrada caliente vs tiempo (Fuente: Elaboración propia).

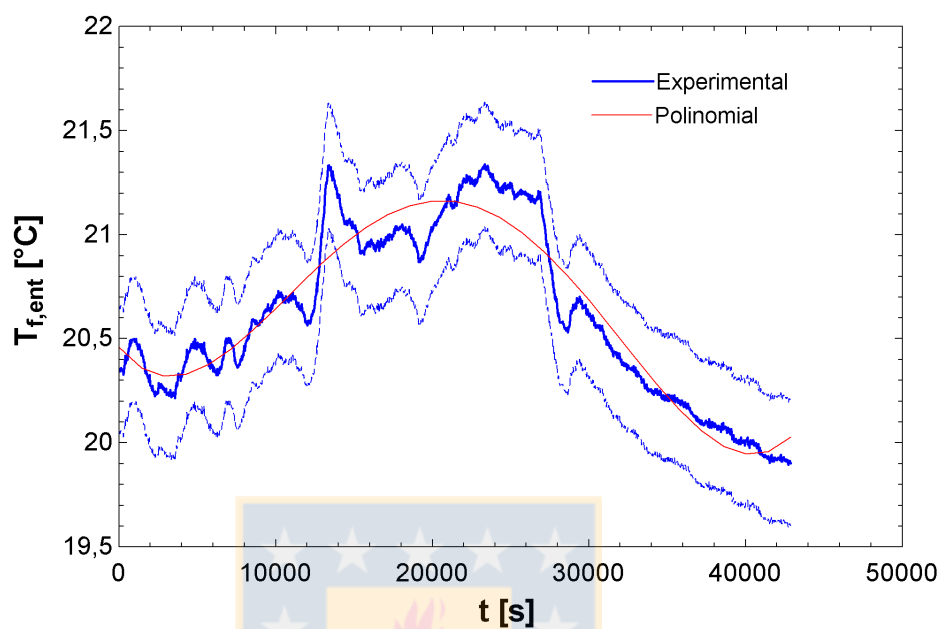


Figura 12. Temperatura de agua de red vs tiempo (Fuente: Elaboración propia).

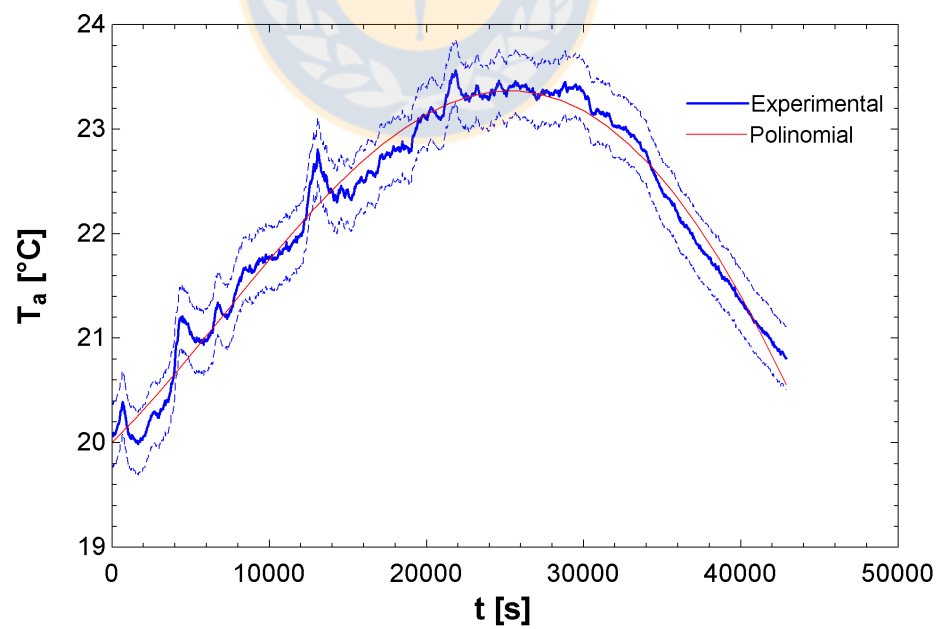


Figura 13. Temperatura de aire vs tiempo (Fuente: Elaboración propia).

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Convergencia de grilla

Para realizar el análisis de convergencia de grilla se considera sólo el caso N°4, para el que se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 14, 15, 16 y 17.

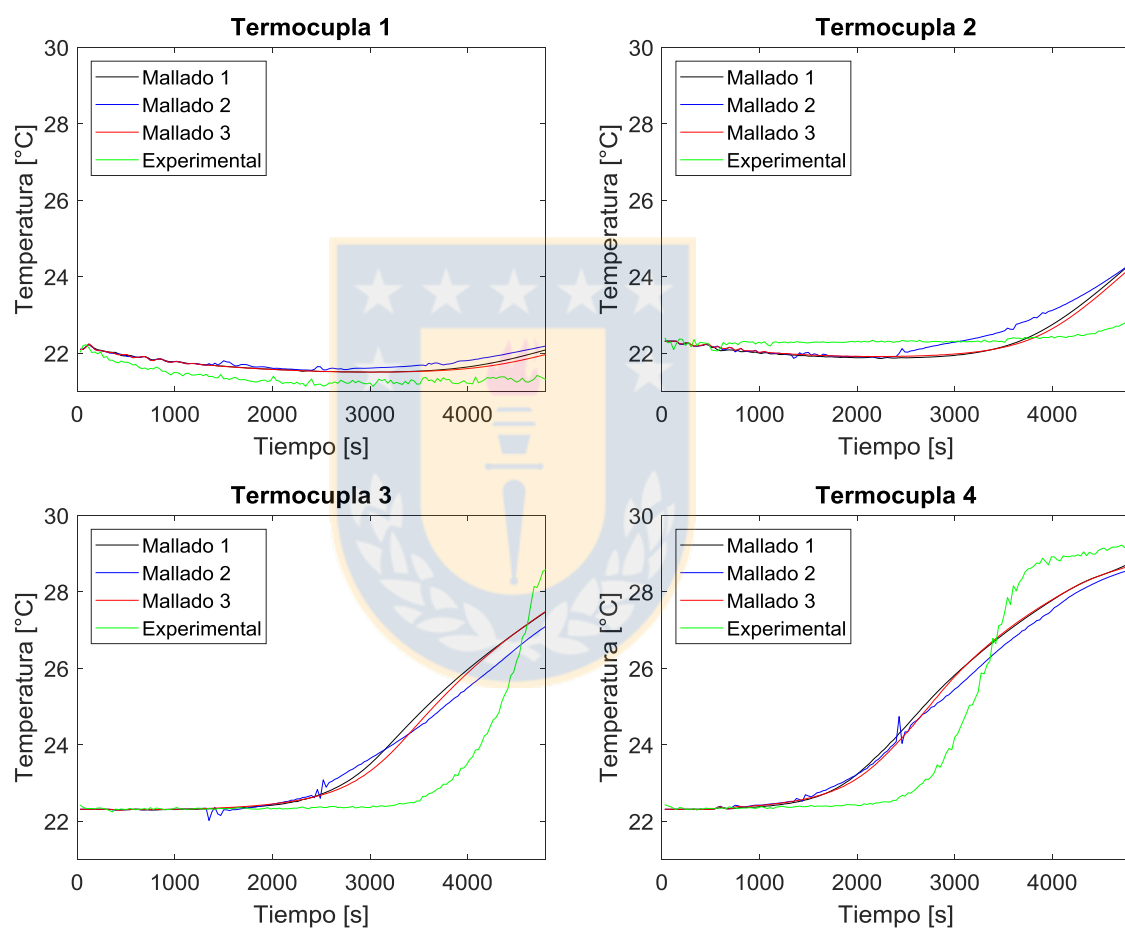


Figura 14. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintos tipos de mallado (Parte 1) (Fuente: Elaboración propia).



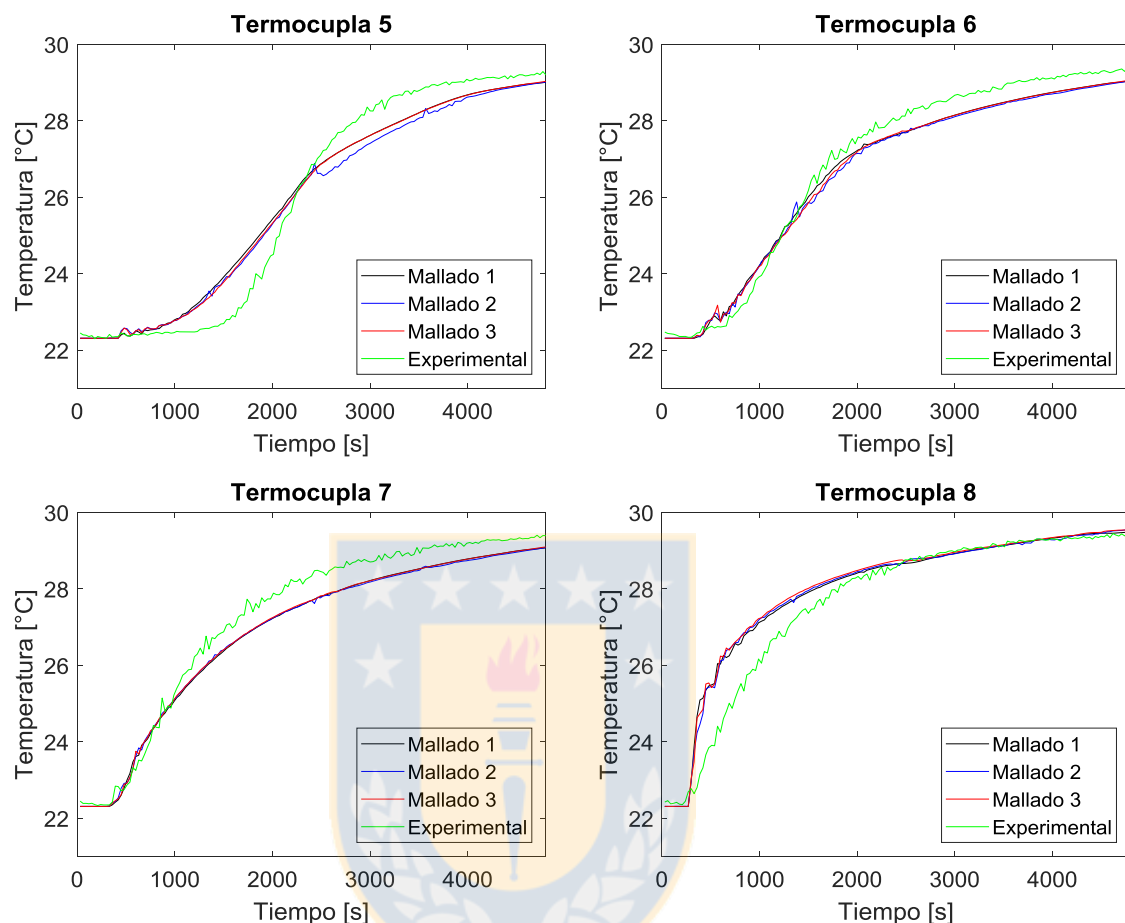


Figura 15. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintos tipos de mallado (Parte 2) (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que no hubo cambio significativo con respecto a los resultados. Las diferencias del segundo mallado se deben principalmente a dificultades de convergencia de los resultados numéricos por parte del modelo de turbulencia. La diferencia de temperatura máxima entre el primero y el tercer mallado no supera los 0,45 [°C]. Por ende, los resultados convergen y el primer mallado es el modelo más adecuado considerando la relación ahorro de tiempo – calidad de resultados.

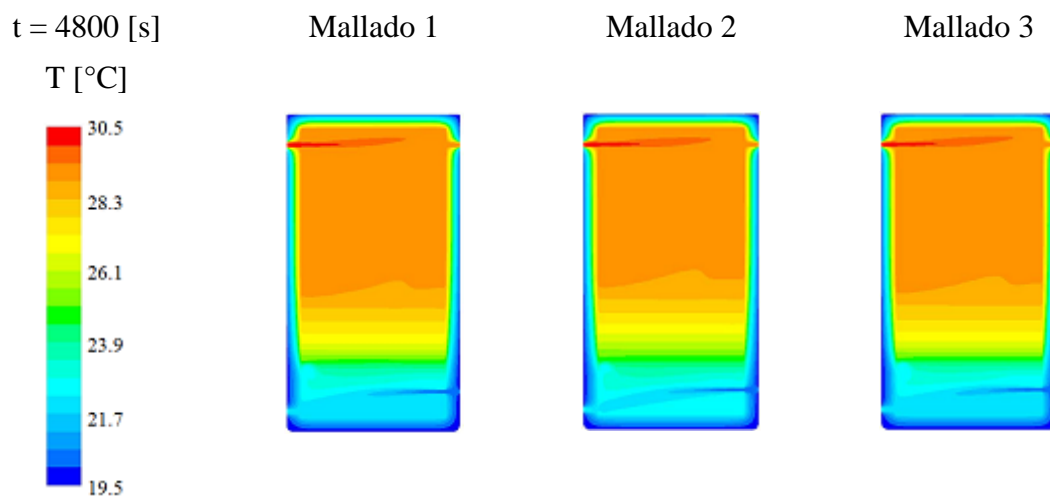


Figura 16. Contornos de temperatura para distinto tipos de mallado (para el caso N°4)  
(Fuente: Elaboración propia).

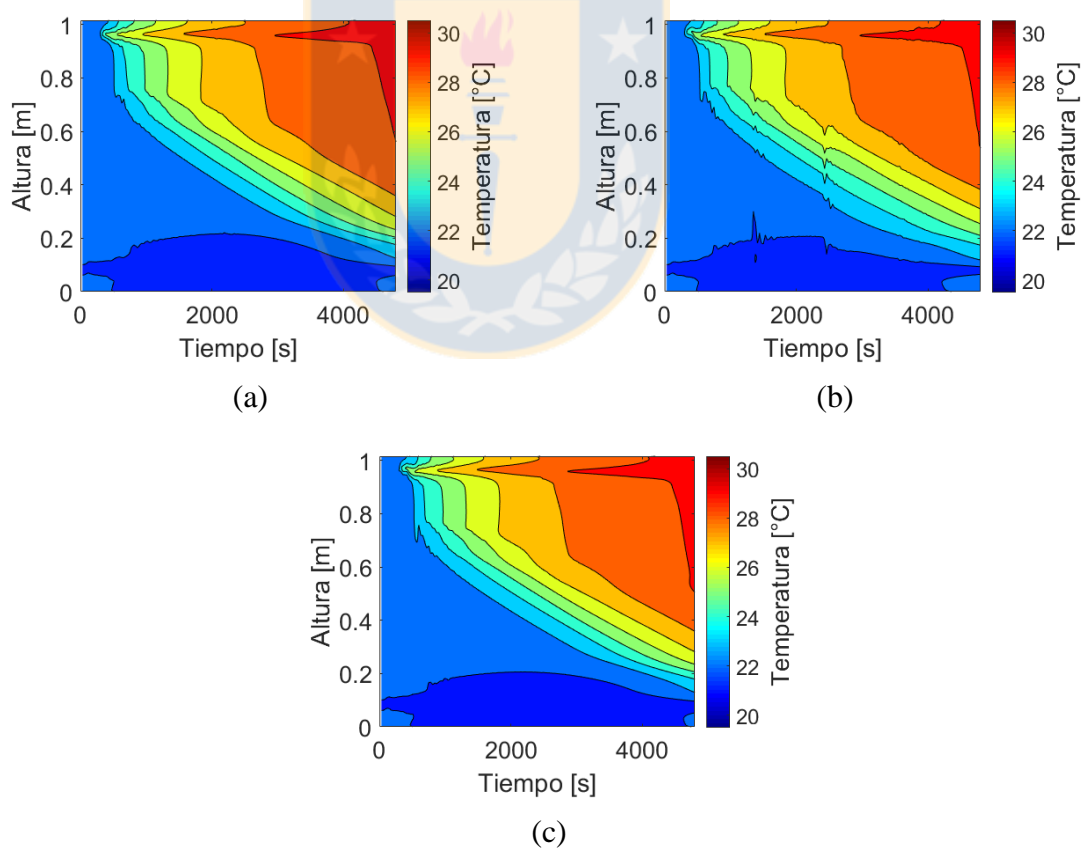


Figura 17. Niveles de contornos de temperatura altura vs tiempo para distintos mallados  
(para el caso N°4) (Fuente: Elaboración propia); (a) Mallado 1, (b) Mallado 2 y (c)  
Mallado 3 .

### 6.3.2 Comparación de tipos de condiciones de pared

Simulando los casos mencionados en la Tabla 9, se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 18 y 19. Las termocuplas enumeradas están indicadas en la Tabla 11.

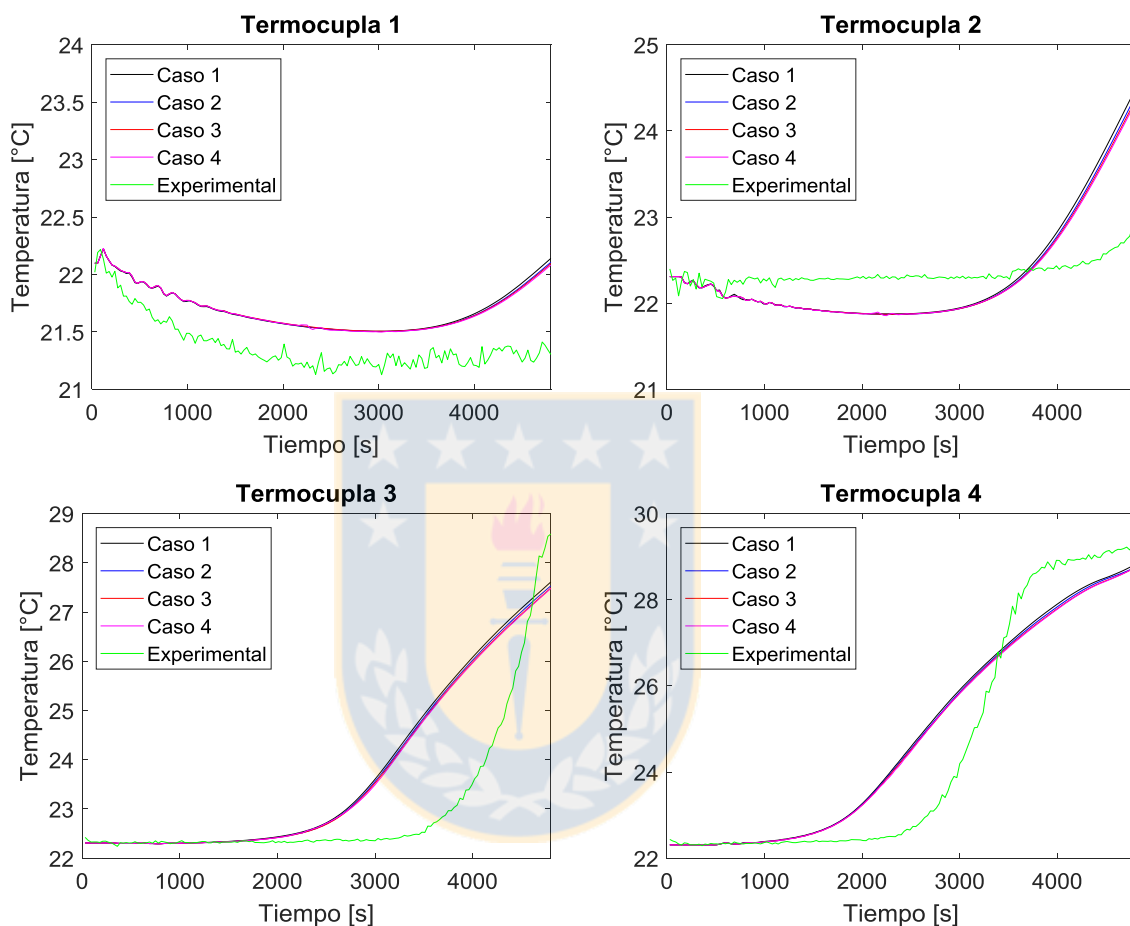


Figura 18. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintas condiciones de pared en distintas posiciones (Parte 1) (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede observar, en todos los casos se obtiene la misma tendencia, donde para un tiempo de 4800 [s] la diferencia máxima es de 0,2 [°C]. Es decir, el efecto de conducción en la pared no afecta mayormente los resultados y tampoco la transferencia de calor con el ambiente.

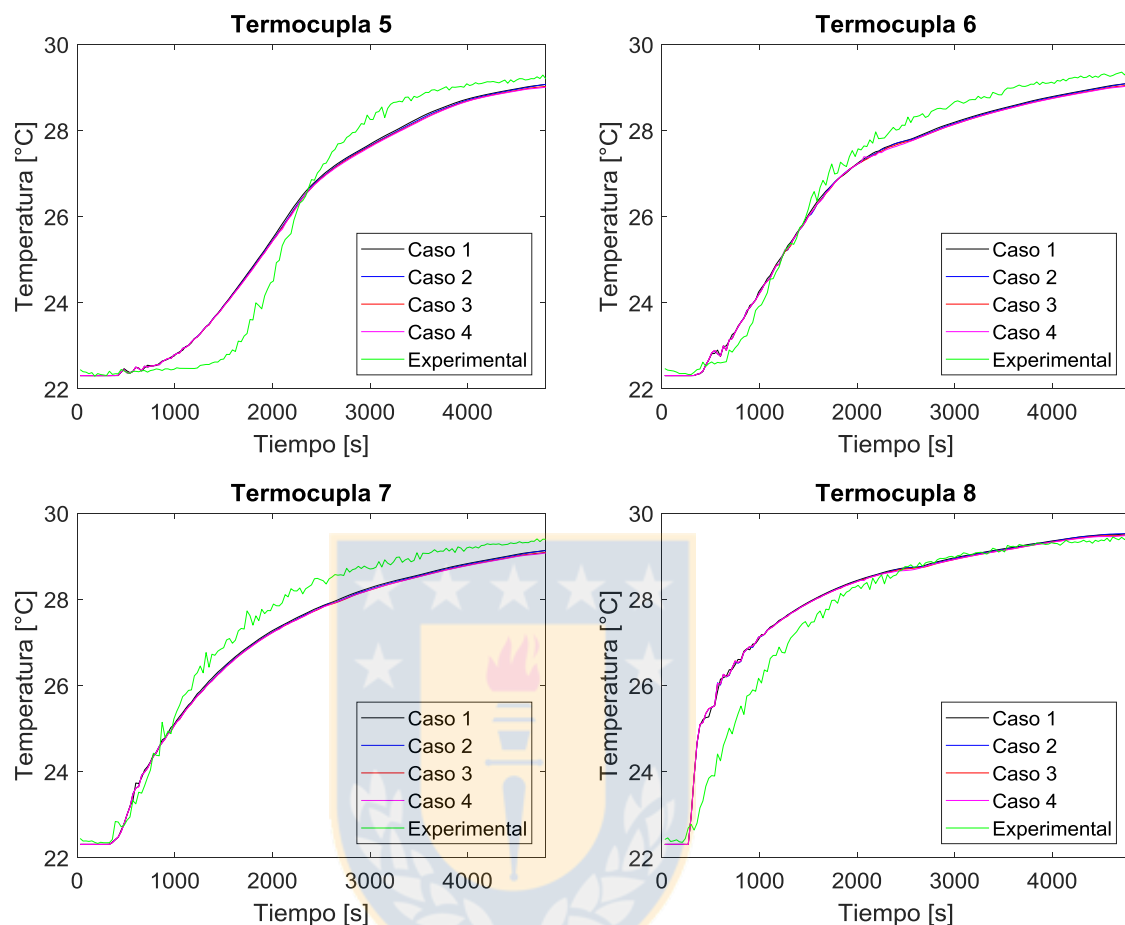


Figura 19. Gráficos comparativos de perfiles de temperatura temporal para distintas condiciones de pared en distintas posiciones (Parte 2) (Fuente: Elaboración propia).

Sin embargo, existe discrepancia entre los resultados de las simulaciones y los experimentales en las termocuplas 2, 3 y 4, donde los resultados de las simulaciones entregan una respuesta más lenta y con una diferencia de temperatura que no supera los 2,7 [°C]. Las posibles causas de la discrepancia son:

- La incertidumbre del caudal del circuito de calentamiento, el cual es determinado por balance de energía.
- La conductividad del agua, que se considera como isótropa en la simulación.
- Durante la simulación, no hubo efectos de mezcla en la zona termoclina (zona intermedia entre fría y caliente). Eso se demuestra en la sección 7.4.

Con los resultados de las simulaciones mostradas anteriormente, observando que algunas curvas cumplen por lo menos en la tendencia, se concluye que la metodología utilizada en este estudio es válida, permitiendo confiar en la veracidad de las simulaciones que se realizarán posteriormente. Sin embargo, se proponen mejoras como comparar el uso de distintos modelos de turbulencia para verificar la discrepancia, como también definir de mejor forma las condiciones de entrada.

#### **6.4 Observaciones generales y propuestas de mejora del ensayo**

Dado que los errores no sólo se deben a la metodología del modelado sino que también a las mediciones experimentales, se proponen las siguientes propuestas de mejora:

- Verificar que las termocuplas están bien soldadas, pues de lo contrario el error puede llegar a ser importante.
- Verificar que el estanque se encuentra aislado de vibraciones producidas por otros componentes (bombas), ya que someter el sistema a fuerzas externas puede influir en la mezcla del agua.
- Instalar más termocuplas, de manera de obtener mejor resolución de la tendencia, sobre todo en la zona termoclina. También instalar más de una termocupla por cada altura para verificar la diferencia de temperatura.
- Comprobar la posición de las termocuplas, ya que como en este caso en particular el gradiente térmico es mayor en la zona de la termoclina en la dirección vertical, un pequeño error en la estimación de la ubicación en la altura puede inducir errores significativos. En la sección 7.2 se hace un análisis más detallado de esto.

## CAPITULO 7

### Análisis de los resultados y discusiones

#### 7.1 Campos de temperatura

En las Figuras 20 y 21 se muestran los contornos de temperatura obtenidos de la simulación para diferentes instantes de tiempo.

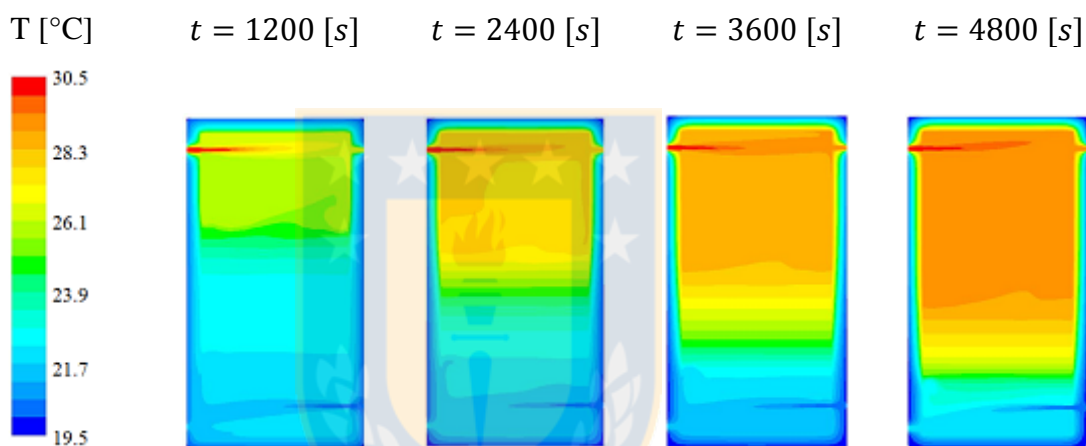


Figura 20. Contornos de temperatura para distinto tiempos de simulación (para el caso N°4) (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que desde los 3000 segundos aproximadamente, se forma la termoclina debido al equilibrio térmico y luego esta se desplaza en forma lineal. Este desplazamiento lineal se debe a que los flujos son constantes en el tiempo. Como el flujo del agua caliente es mayor que el de la red, la posición de la termoclina desciende.

En la Figura 20 se observa una variación de temperatura con respecto a la horizontal sólo cuando se encuentra alejado de los ductos, puesto que en esta zona las velocidades son casi nulas como se puede observar en la Figura 24 (en la sección 7.4). También, en la Figura 21, se observan unas perturbaciones térmicas en las alturas  $H = 90$  [mm] y  $H = 960$  [mm]. Estas perturbaciones son producto de los flujos que ingresan al estanque.

Cabe mencionar que estas condiciones son válidas sólo hasta cuando la termoclina llega a la parte inferior. Al llegar en este punto la situación cambia, ya que cabe recordar que el fluido que entra caliente al estanque depende demasiado de la salida ubicada en la parte inferior. Es decir, si el agua sale del estanque con mayor temperatura (cuando la termoclina está en el extremo inferior), la temperatura de entrada superior debería ser aún mayor por el calor que recibe el agua en el circuito de calentamiento.

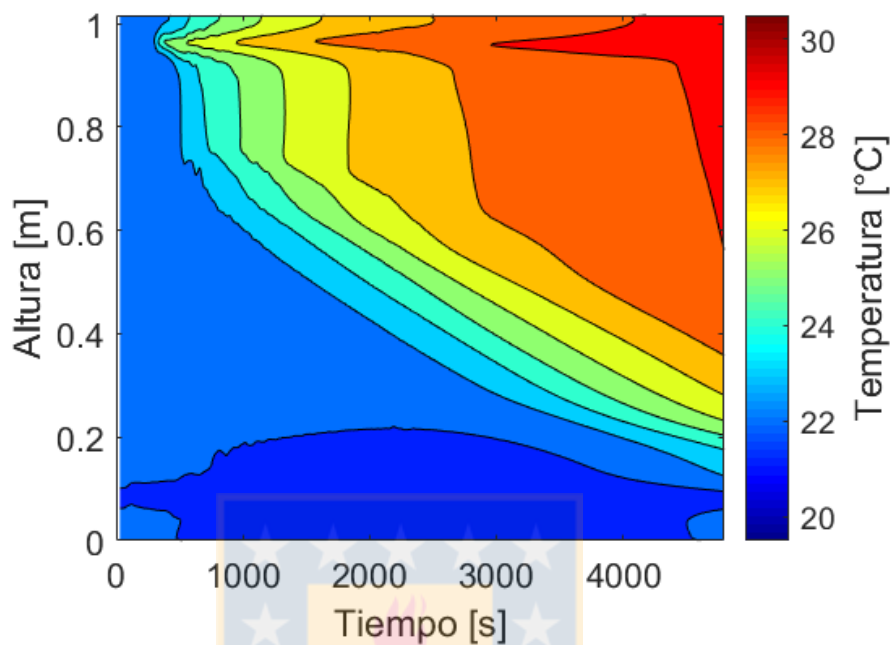


Figura 21. Contorno de temperatura altura vs tiempo (Fuente: Elaboración propia).

## 7.2 Variación de las temperaturas con respecto a la posición de las termocuplas

A continuación se analiza en forma detallada la termocupla 5, donde se tiene una mayor discrepancia entre la simulación y la medición experimental. Para esto se considera una variación de 5 [cm] en forma vertical, con lo que se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 22.

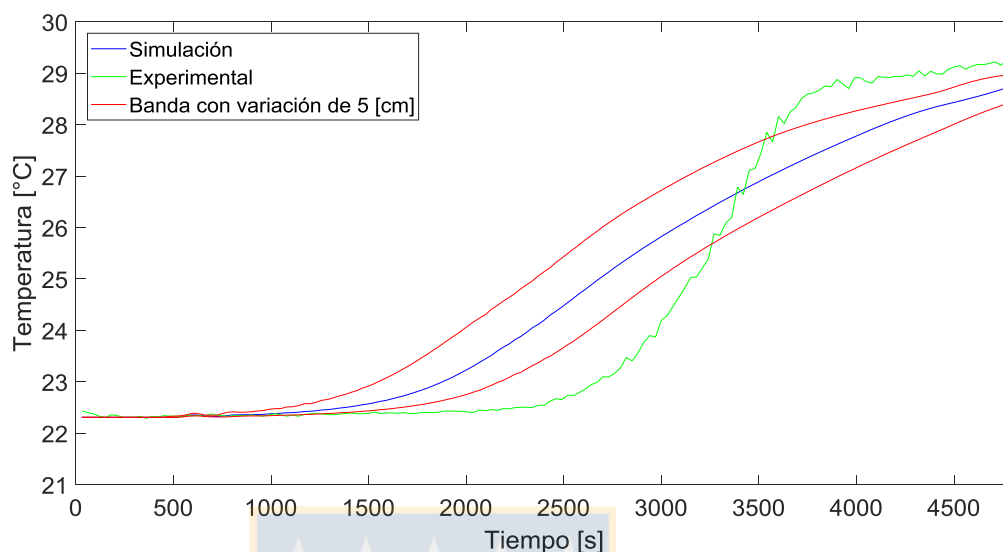


Figura 22. Gráfico de perfil de temperatura temporal de la termocupla N°5 con banda de error de posición de  $\pm 5$  [cm] (Fuente: Elaboración propia).

Se obtiene que una variación de la posición de  $\pm 5$  [cm] influye considerablemente en los resultados de la temperatura simulada. Esta variación es muy sensible cuando la posición se encuentra en la zona de la termoclina debido a su mayor gradiente térmico en la dirección vertical, obteniéndose una variación que varía entre 0,85 y 0,96 [°C]. Por lo tanto, la posición de la termocupla es una de las posibles causas de la discrepancia con los resultados experimentales, así y toda la respuesta del modelo es aún más lenta.

### 7.3 Efecto del espesor de la pared del estanque

En la Figura 23 se muestran los contornos de temperatura que entrega la simulación considerando un espesor de la capa de acero de 3 [mm] (3 veces la del ensayo). Este valor de espesor es referencial de los estanques que se encuentran de forma comercial.

Se observa que, al comparar los resultados mostrados en las Figuras 20 y 23, se obtienen resultados prácticamente idénticos. Por ende, variar el espesor de la capa de acero no cambia el tamaño ni altera la estratificación ni la termoclina del estanque. Es decir, no se modifica la estratificación y daría lo mismo considerar o no la pared, por lo que una simulación con fluido adiabático es una buena aproximación.



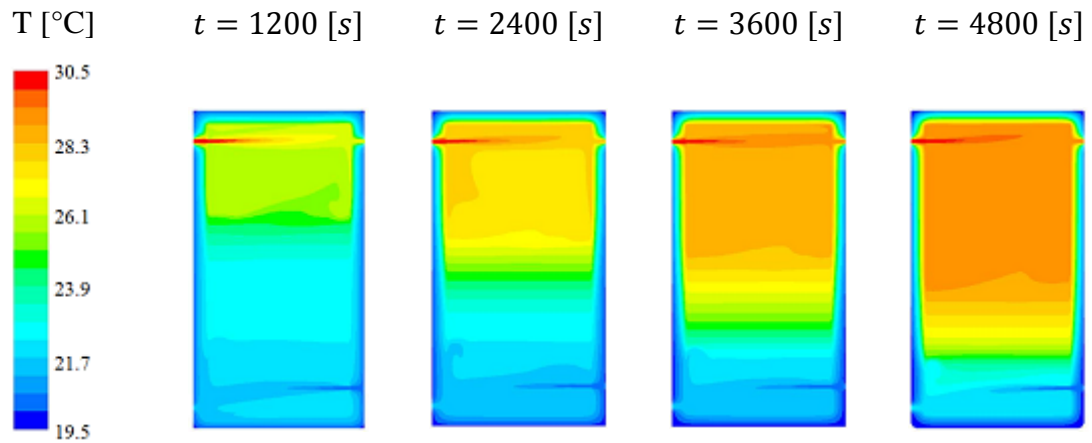


Figura 23. Contornos de temperatura del estanque de ensayo modificado para distinto tiempos de simulación (Fuente: Elaboración propia).

#### 7.4 Campos de velocidad

En la Figura 24 se muestra un contorno de velocidad para un tiempo de simulación. En general se observa que para todo el periodo de simulación, no existe un cambio significativo en las magnitudes de las velocidades.

Se observa que las zonas más críticas, donde se genera mayor turbulencia, se encuentran a nivel de las entradas y salidas de las cañerías. Esto debido a que las cañerías presentan un diámetro significativamente menor que el del estanque y por ende las velocidades son comparativamente mucho más altas. También se observa que la velocidad en la cañería superior izquierda es igual a la inferior izquierda y la inferior derecha a la de superior derecha.

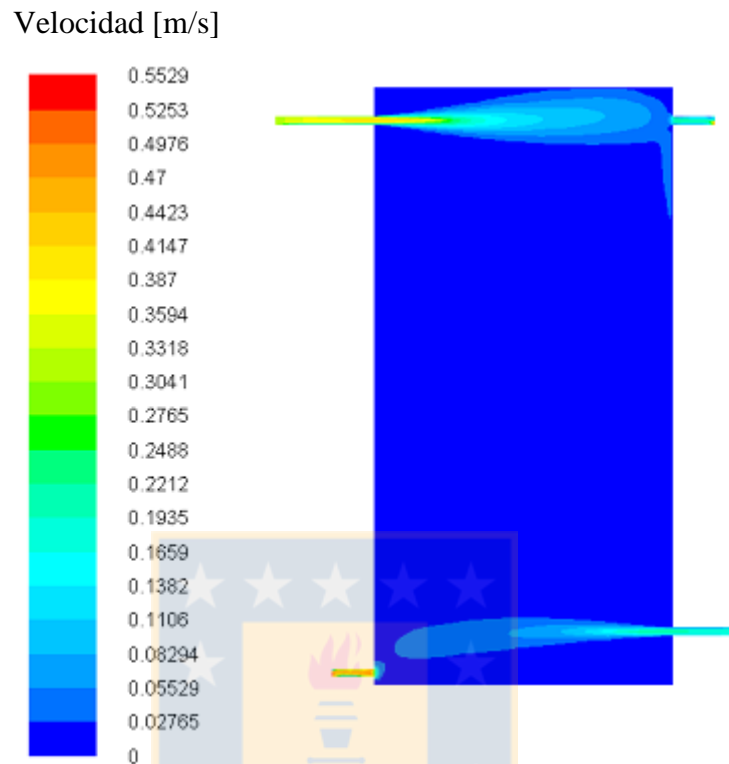


Figura 24. Contorno de velocidad (Tiempo de simulación = 2400 [s]) (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 25 se muestran los vectores de campos de velocidad en la parte superior e inferior. Se observa que en las zonas caliente y fría se produce el fenómeno de mezcla de agua donde se homogenizan sus respectivas temperaturas debido al equilibrio térmico. Y con el tiempo se obtiene que estas zonas descienden constantemente debido a la diferencia de los flujos que ingresan al estanque.

Finalmente, en la Figura 26 se muestran algunos contornos de velocidades en dirección axial del estanque en distintas secciones de corte. Las velocidades positivas indican que el fluido está ascendiendo y las negativas que el fluido está descendiendo.

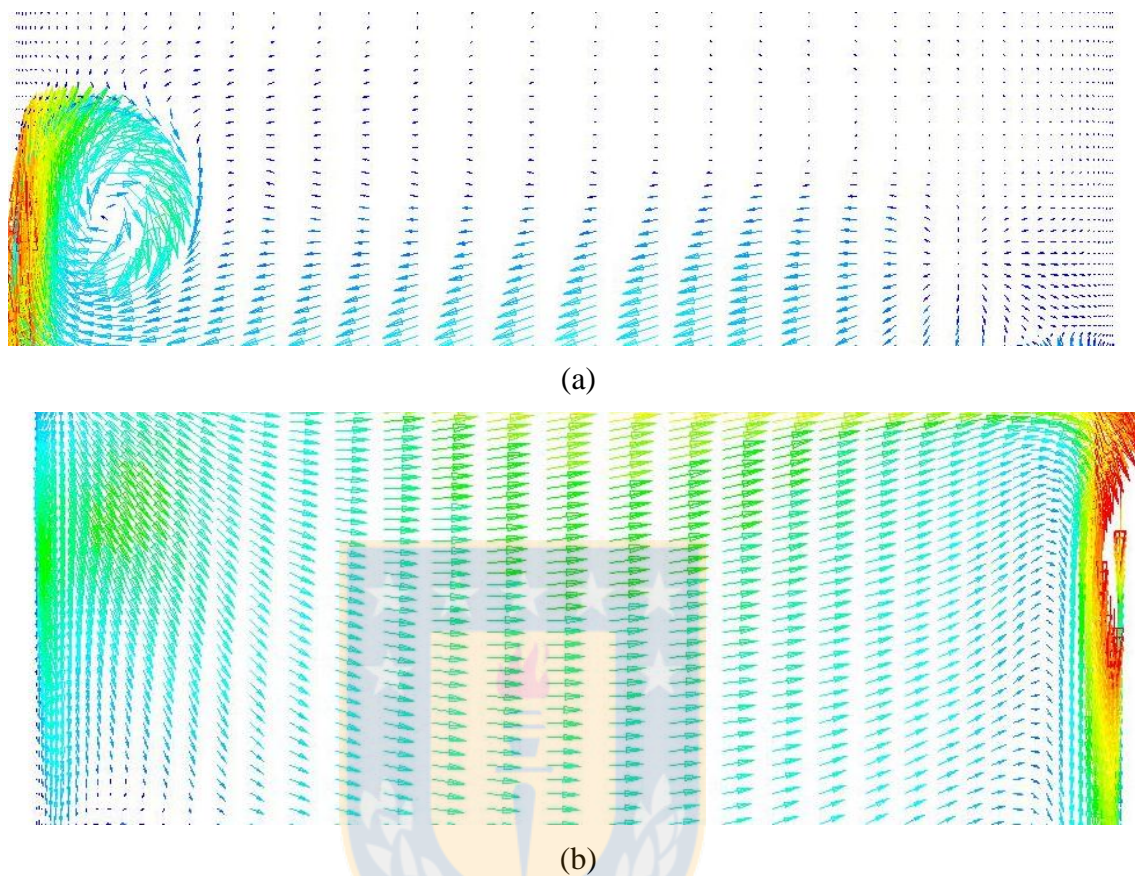


Figura 25. Contornos de velocidad en vector (Tiempo de simulación = 2400 [s]) (Fuente: Elaboración propia): (a) Parte Inferior, (b) Parte superior.

En la Figura 26a y 26c se observa que en los costados existen velocidades que son distorsionadas por los flujos provenientes de cada cañería y se mezclan con el agua almacenada en el estanque, formándose las zonas caliente y fría. La dirección de los flujos caliente y frío de acuerdo a las coordenadas indicadas en esta figura son  $y+$  e  $y-$  respectivamente. Se obtiene que, por la diferencia de temperatura donde la temperatura del flujo caliente es mayor que el agua almacenada, las partículas de agua responden ascendiendo y la temperatura del flujo frío se realiza de forma contraria. Por otro lado, en la Figura 26b, se aprecia que existen velocidades descendentes que son considerables, en comparación con las velocidades que van en el otro sentido, debido a la diferencia del flujo, ya que el flujo caliente es mayor que el flujo proveniente de la red de agua. Debido a lo anterior, se produce la formación de la termoclina, en donde el grado de mezcla es relativamente más bajo que en los extremos.

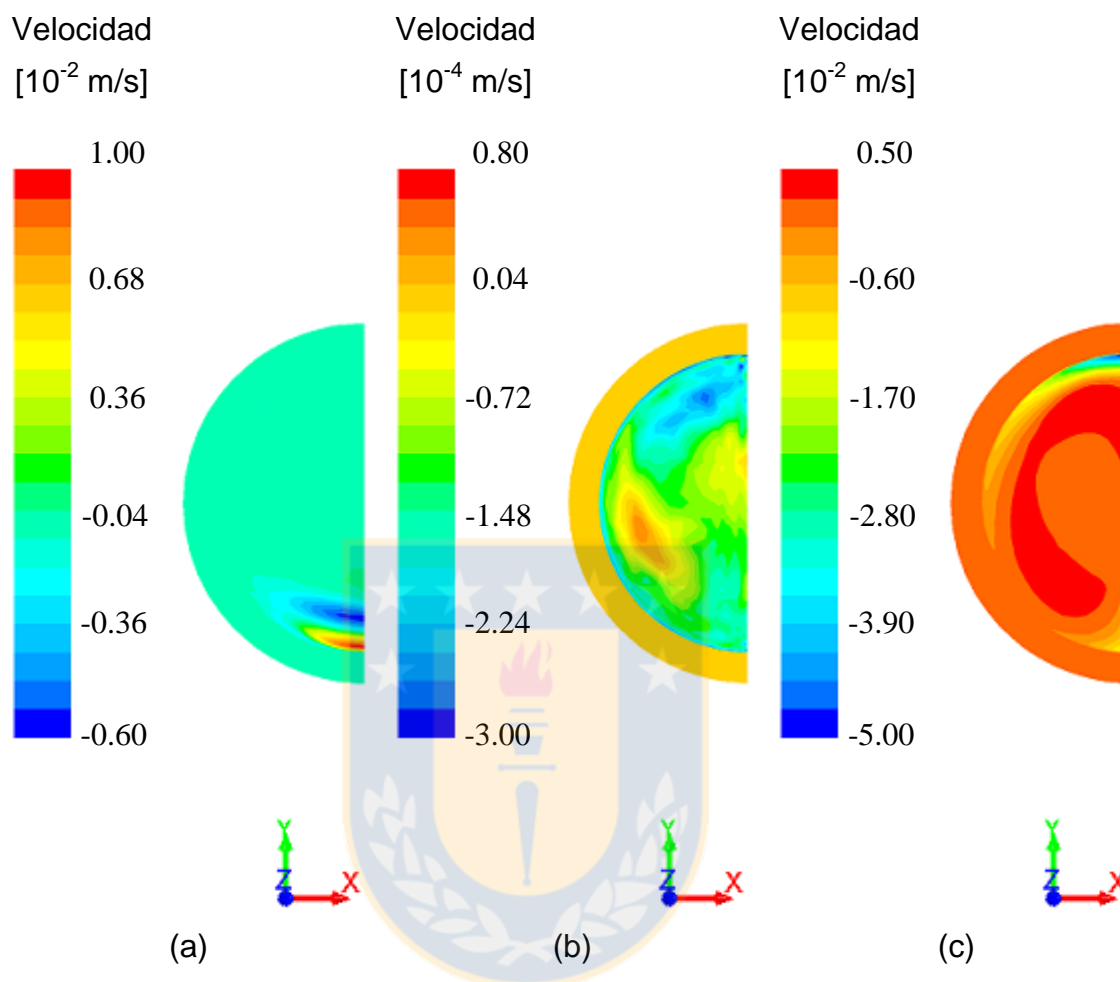


Figura 26. Contornos de velocidad Z en distintos cortes transversales (Tiempo de simulación = 2400 [s]) (Fuente: Elaboración propia): (a) Altura = 200 [mm], (b) Altura = 550 [mm], (c) Altura = 900 [mm].

Sin embargo no se logra apreciar un patrón de movimiento del agua bien definido en el estanque, lo que pone en duda la hipótesis de simetría utilizada en este estudio. En general se observa que las velocidades de desplazamiento del agua son muy bajas.

## CAPITULO 8

### Conclusiones y perspectivas

#### 8.1 Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada en este estudio permitió orientar el estudio a realizar en esta tesis, el cual consistió en el análisis del efecto de conducción de la pared del estanque sobre la estratificación. Para desarrollar este estudio se debió realizar un modelo geométrico de un estanque de mezcla directa, optimizando el mallado y la cantidad de grillas mediante el procedimiento de convergencia de grilla. Posterior a esto se define el modelo físico y las condiciones de frontera para realizar una serie de simulaciones mediante CFD, mediante el software ANSYS Fluent.

Con respecto a la validación de la metodología usada en este estudio a través de una comparación con datos experimentales, se obtuvieron resultados aceptables donde la mayoría de los casos cumple la tendencia del fenómeno de la estratificación. Sin embargo, llega a errores significativos con una diferencia máxima de 2,7 [°C], por lo que se han propuesto una serie de mejoras tanto en este trabajo como en la caracterización experimental, con el fin de garantizar la calidad de los resultados. Se hace un análisis sobre una de las termocuplas evaluando los resultados numéricos en 5 [cm] y se obtiene que podría llegar a variar cerca de 1 [°C] cuando se encuentra en la zona de termoclina.

Con respecto a las simulaciones realizadas en este trabajo, se demuestra que en fenómeno de conducción en la pared del estanque no afecta en forma significativa la estratificación del agua durante los primeros 4800 [s]. Por ende, independiente si la condición de la pared exterior del estanque estratificado considera o no la transferencia de calor con el entorno, el resultado de la estratificación será prácticamente el mismo. Esta contribución permite demostrar que para simulaciones a corto plazo (de orden de minutos), el uso de la condición adiabática permite ahorrar el trabajo de modelar las capas de sólidos, minimizar la cantidad de datos y reducir el tiempo de simulación mediante el método CFD.

## 8.2 Perspectivas

Para mejorar los resultados de este trabajo se propone realizar una serie de mejoras y nuevas ideas para extender así el estudio. Las propuestas son las siguientes:

- Para minimizar la cantidad de grillas, al modelo geométrico se propone quitar los ductos y reemplazar la entrada con un perfil de velocidades definido mediante el uso de UDFs.
- El hecho de que con el software ANSYS Fluent se pudo simular el estanque con todos sus componentes y que el tiempo que se invierte en el cálculo computacional entre modelar “con capas de sólidos” y “sólo el fluido” es bajo, se podría modelar con el mismo método un estanque de contacto indirecto, agregando otro sólido que representaría el espiral que separa los dos fluidos. De esta forma se podría observar el desempeño de la estratificación comparando un estanque de este tipo con uno de contacto directo.



## REFERENCIAS

Assari, M. R., Tabrizi, H. B., & Movahedi, M. J. (2018). Experimental study on destruction of thermal stratification tank in solar collector performance. *Journal of Energy Storage*, *15*, 124-132.

Baeten, B., Confrey, T., Pecceu, S., Rogiers, F., & Helsen, L. (2016). A validated model for mixing and buoyancy in stratified hot water storage tanks for use in building energy simulations. *Applied Energy*, *172*, 217-229.

Bouhal, T., Fertahi, S., Agrouaz, Y., El Rhafiki, T., Kousksou, T., & Jamil, A. (2017). Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study. *Solar Energy*, *157*, 441-455.

Dehghan, A. A., & Barzegar, A. (2011). Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation. *Energy Conversion and Management*, *52*(1), 468-476.

Dragsted, J., Furbo, S., Dannemand, M., & Bava, F. (2017). Thermal stratification built up in hot water tank with different inlet stratifiers. *Solar Energy*, *147*, 414-425.

Erdemir, D., & Altuntop, N. (2016). Improved thermal stratification with obstacles placed inside the vertical mantled hot water tanks. *Applied Thermal Engineering*, *100*, 20-29.

Fan, J., & Furbo, S. (2012). Buoyancy driven flow in a hot water tank due to standby heat loss. *Solar Energy*, *86*(11), 3438-3449.

Fluent, A.N.S.Y.S. (2013). Release 15.0. *Theory Guide*, November.

Gasque, M., González-Altozano, P., Maurer, D., Moncho-Esteve, I. J., Gutiérrez-Colomer, R. P., Palau-Salvador, G., & García-Marí, E. (2015). Study of the influence of inner lining material on thermal stratification in a hot water storage tank. *Applied Thermal Engineering*, *75*, 344-356.

Hafez, A. M., Kassem, M. A., & Huzayyin, O. A. (2018). Smart adaptive model for dynamic simulation of horizontal thermally stratified storage tanks. *Energy*, *142*, 782-792.

Haller, M. Y., Cruickshank, C. A., Streicher, W., Harrison, S. J., Andersen, E., & Furbo, S. (2009). Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes—review and theoretical comparison. *Solar Energy*, *83*(10), 1847-1860.

Han, Y. M., Wang, R. Z., & Dai, Y. J. (2009). Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(5), 1014-1026.

Hoffmann, J. F., Fasquelle, T., Goetz, V., & Py, X. (2016). A thermocline thermal energy storage system with filler materials for concentrated solar power plants: Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales. *Applied Thermal Engineering*, *100*, 753-761.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1981). Fundamental of heat transfer. *John Wiley & Sons, New York*, 406.

Jerez, J. (2015). *Validación de modelos generales para la evaluación de sistemas solares térmicos en Concepción y su aplicación al mapa solar*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Kurşun, B., & Ökten, K. (2018). Effect of rectangular hot water tank position and aspect ratio on thermal stratification enhancement. *Renewable Energy*, *116*, 639-646.

Lu, S., Zhang, T., & Chen, Y. (2018). Study on the performance of heat storage and heat release of water storage tank with PCMs. *Energy and Buildings*, *158*, 1770-1780.

Ministerio de Energía de Chile. (2013). Manual práctico del técnico solar: Sistemas Solares Térmicos de Agua Caliente Sanitaria en viviendas unifamiliares. Diario Oficial de Chile.

Ministerio de Energía de Chile. (2016). Norma Técnica que determina algoritmo para la verificación de la contribución solar mínima de los Sistemas Solares Térmicos acogidos a la franquicia tributaria de la ley N° 20-.365. Diario Oficial de Chile.



Moncho-Esteve, I. J., Gasque, M., González-Altozano, P., & Palau-Salvador, G. (2017). Simple inlet devices and their influence on thermal stratification in a hot water storage tank. *Energy and Buildings*, *150*, 625-638.

Rahman, A., Smith, A. D., & Fumo, N. (2016). Performance modeling and parametric study of a stratified water thermal storage tank. *Applied Thermal Engineering*, *100*, 668-679.

Saelzer, M. (2015). *Análisis experimental y desarrollo de un modelo semi-empírico de un estanque de acumulación de agua caliente de un sistema solar*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Wang, Z., Zhang, H., Dou, B., Huang, H., & Zhang, G. (2017). The thermal stratification characteristics affected by a novel equalizer in a dynamic hot water storage tank. *Applied Thermal Engineering*, *126*, 1006-1016.

Wang, Z., Zhang, H., Dou, B., Huang, H., Wu, W., & Wang, Z. (2017). Experimental and numerical research of thermal stratification with a novel inlet in a dynamic hot water storage tank. *Renewable Energy*, *111*, 353-371.

Yaïci, W., Ghorab, M., Entchev, E., & Hayden, S. (2013). Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design. *Applied thermal engineering*, *60*(1-2), 152-163.

Yang, Z., Chen, H., Wang, L., Sheng, Y., & Wang, Y. (2016). Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification. *Renewable Energy*, *85*, 31-44.

Zachar, A., Farkas, I., & Szlivka, F. (2003). Numerical analyses of the impact of plates for thermal stratification inside a storage tank with upper and lower inlet flows. *Solar Energy*, *74*(4), 287-302.

## ANEXOS

### A.1 Anexos A: Rutero UDF para condiciones de entrada (temperaturas ambiente, entrada de agua caliente y de la red)

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(Temperatura_aire,c,i)
{
    real x[ND_ND];
    real time = RP_Get_Real("flow-time");
    face_t f;
    begin_f_loop(f, c)
    {
        F_PROFILE(f,c,i) = 273.15+20.0035-0.000147069*time+5.56657e-9*pow(time,2)-
2.98303e-13*pow(time,3)+2.22582e-18*pow(time,4);
    }
    end_f_loop(f, t)
}
#define t0 270
#define t1 450
DEFINE_PROFILE(Temperatura_caliente,c,i)
{
    real x[ND_ND];
    real time = RP_Get_Real("flow-time");
    face_t f;
    begin_f_loop(f, c)
    {
        if (time < t0)
            F_PROFILE(f,c,i) = 273.15+22.309;
        else if (time >= t0 && time < t1)
            F_PROFILE(f,c,i) = 273.15+389.773-4.504*time+0.0199024*pow(time,2)-
0.0000376179*pow(time,3)+2.59675e-8*pow(time,4);
        else
            F_PROFILE(f,c,i) = 273.15+30.3378+0.00027563*time-2.6283e-
7*pow(time,2)+6.61023e-11*pow(time,3)-4.93116e-15*pow(time,4);
    }
    end_f_loop(f, t)
}
DEFINE_PROFILE(Temperatura_red,c,i)
{
    real x[ND_ND];
    real time = RP_Get_Real("flow-time");
    face_t f;

```

```
begin_f_loop(f, c)
{
  F_PROFILE(f,c,i) = 273.15+20.4588-0.0000929915*time+1.76502e-
8*pow(time,2)-7.33374e-13*pow(time,3)+8.55578e-18*pow(time,4);
}
end_f_loop(f, t)
}
```

