



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE DISEÑOS PARA UNA POZA SOLAR EXPERIMENTAL:  
SELECCIÓN DE FORMA Y DIMENSIONES

MEMORIA PARA OPTAR A TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS ALONSO NARVÁEZ DÍAZ

PROFESOR GUÍA:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ  
JOSÉ CARDEMIL IGLESIAS

SANTIAGO DE CHILE  
2019

## EVALUACIÓN DE DISEÑOS PARA UNA POZA SOLAR EXPERIMENTAL: SELECCIÓN DE FORMA Y DIMENSIONES

Una poza solar corresponde a una fuente colectora y almacenadora de energía solar, la cual puede ser utilizada para abastecer procesos de temperatura moderada. Su implementación a escala industrial presenta un alto costo de fabricación y mantención, por lo que es razonable optar por la fabricación de una poza de tipo experimental, la cual permite estudiar el desempeño y evaluar la viabilidad de la construcción de esta a escala industrial.

En el presente estudio se muestra la implementación de metodologías basadas en el modelamiento computacional de fenómenos físicos relevantes para el estudio de las dimensiones laterales mínimas necesarias para el correcto funcionamiento de una poza solar experimental que, operando en el norte de Chile sirva como modelo para aquellas de escala industrial.

Los objetivos específicos consisten en: recopilar información sobre diseño y operación de pozas solares. Identificar las características principales que debe cumplir un modelo experimental para que sea representativo del proceso real. Utilizar técnicas de modelación para evaluar y elegir modelos según los criterios seleccionados. Elaborar y estudiar los modelos asociados a los fenómenos en estudio. Y finalmente, utilizar los modelos para determinar las características de la poza experimental representativa.

Se identifican los principales fenómenos físicos que presentan cambios significativos en el comportamiento de la poza al variar su dimensión horizontal. Entre estos fenómenos se estudian: evaporación superficial de la Zona Convectiva Superior, conducción hacia paredes laterales en la Zona No Convectiva, y convección natural en la Zona Convectiva Inferior.

Los recursos usados corresponden a *Ansys (Fluid-Flow Fluent)* para la elaboración y puesta en marcha del modelo, y *Microsoft Excel* para el procesamiento de los resultados obtenidos.

A partir de los modelos elaborados, se registran longitudes características asociadas a la influencia de cada uno de los fenómenos, las cuales permiten seleccionar un largo mínimo para la poza solar experimental.

El ancho mínimo asociado al fenómeno de evaporación en la superficie de la Zona Convectiva Superior es de 17,7 [m] a partir de la cual dicho efecto deja de percibir cambios considerables. Para el fenómeno de conducción en la Zona No Convectiva, se determina un ancho de 15,3 [m] de influencia de los gradientes térmicos cercanos a las paredes. Para el fenómeno de convección en la Zona Convectiva Inferior, se identifica que el ancho característico de los rollos convectivos es de 2 a 3 [m]. Se observa que, independiente de la cantidad de rollos formados, se mantienen las propiedades de temperatura uniforme en su interior. El mayor de estos largos determina el ancho mínimo de la poza solar experimental, el cual corresponde a 17,7 [m].

*A Paula, quien hace que todo esfuerzo en la vida tenga mucho más sentido.  
Te amo mi amor.*

## Agradecimientos

A los profesores, quienes siempre tuvieron la disposición y preocupación por llevar este trabajo a cabo de la mejor forma. Muchas gracias por sus comentarios y aportes realizados tanto a nivel académico como de formación personal.

A mis amigos, quienes hicieron que este paso por la universidad tenga mucho más sentido, por entregarme motivación y muy buenos momentos.

A mi familia, quienes siempre han tenido plena confianza en mí y en mis capacidades, gracias a su apoyo incondicional he podido lograr mis objetivos en la vida. Mas allá de lo logrado académicamente, les agradezco la formación como persona que me han brindado.

Finalmente, agradezco a mi compañera de vida, Paula. Quien me ha acompañado durante este proceso de manera incondicional, cuyo apoyo y motivación son fundamentales para que estos logros se hagan realidad. Me has enseñado que el esfuerzo y la perseverancia son los pilares principales para cumplir las metas en la vida.

# Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1	Antecedentes generales .....	1
1.2	Motivación .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.3.1	Objetivo General.....	2
1.3.2	Objetivos Específicos.....	2
1.4	Alcances .....	3
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	4
2.1	Características de pozas solares existentes .....	4
2.2	Solución salina y concentración según estrato .....	4
2.3	Temperaturas en cada estrato .....	4
2.4	Generación de gradiente de concentración .....	5
2.5	Ecuaciones fundamentales.....	6
<b>3</b>	<b>DESARROLLO</b> .....	9
3.1	Efectos a considerar en una poza solar .....	9
3.2	Fenómenos relevantes para el estudio .....	9
3.2.1	Evaporación de agua desde la superficie de la poza .....	9
3.2.2	Modos de flujo en la Zona Convectiva Inferior .....	9
3.2.3	Modos de flujo en la Zona Convectiva Superior .....	10
3.2.4	Perfil de temperatura en la Zona No Convectiva.....	10
3.2.5	Perdidas de calor laterales y desde el fondo .....	10
3.3	Ubicación geográfica.....	11
3.4	Geometría de poza solar de escala industrial.....	13
3.5	Condiciones de operación .....	15
3.6	Cálculo de la evaporación en la ZCS.....	17
3.6.1	Métodos de cálculo para la tasa de evaporación en la superficie.....	17
3.6.2	Comparación de métodos de cálculo de evaporación .....	20
3.6.3	Cálculo de evaporación en función del largo de la superficie de la poza.....	21
3.6.4	Resultados tasa de evaporación .....	23
3.7	Fenómeno de conducción hacia paredes laterales.....	26
3.7.1	Condiciones del modelo de conducción.....	26
3.7.2	Resultados modelo de conducción.....	30
3.8	Convección en ZCS y ZCI .....	37
3.8.1	Convección en Zona Convectiva Superior .....	38

3.8.2	Convección en Zona Convectiva Inferior.....	39
3.8.3	Parámetros del modelo.....	39
3.8.4	Resultados de la zona convectiva inferior.....	42
3.8.5	Comparación de resultados obtenidos.....	53
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>57</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de coeficiente de extinción y fracción de radiación solar absorbida.....	8
Tabla 2. Parámetros ambientales promedio de la zona de estudio [12], [13]. .....	12
Tabla 3. Tasas de evaporación obtenidas para cada método. ....	21
Tabla 4. Parámetros de desempeño de malla.....	31
Tabla 5. Espesores de capa límite para cada malla en estudio. ....	32
Tabla 6. Flujos de calor en paredes.....	35
Tabla 7. Tabla resumen balance de calor. ....	36
Tabla 8. Comparación de cantidad y tamaño de rollos convectivos para los distintos modelos. ....	54

# Índice de Figuras

Figura 1. Esquema representativo de una Poza Solar [16].	1
Figura 2. Ejemplo de perfil de temperatura y concentración salina para una poza solar [7].	5
Figura 3. Esquema del balance energético de una Poza Solar [1].	6
Figura 4. Ubicación geográfica de la zona de estudio y mapa terrestre de la zona [15].	11
Figura 5. Radiación Directa Horizontal de 1 año para la zona de estudio [12].	12
Figura 6. Distribución de absorción de energía solar incidente en la poza solar.	13
Figura 7. Vista en planta de poza solar en estudio. Medidas en [cm].	14
Figura 8. Sección transversal de la poza solar de Granada, España. Se esquematizan los perfiles de temperatura y concentración salina. Medidas en [cm].	14
Figura 9. A la izquierda, perfil de temperatura, a la derecha, perfil de densidad de la mezcla [9].	15
Figura 10. Esquema de elementos a utilizar para cálculo de evaporación.	22
Figura 11. Espesor de capa límite de aire sobre la superficie.	23
Figura 12. Tasa de evaporación desde la poza en función del avance horizontal hacia el interior de la poza.	24
Figura 13. Diferencia de tasa de evaporación promedio según tamaño de la poza.	25
Figura 14. Geometría utilizada para el modelo de conducción en la poza, medidas en [cm].	27
Figura 15. Identificación de bordes para la geometría del modelo de conducción.	28
Figura 16. Malla Gruesa utilizada para estudio de fenómeno de conducción.	30
Figura 17. Vista ampliada de esquina inferior derecha de la malla utilizada para el modelo de Malla Gruesa.	31
Figura 18. Gráfico de perfiles de temperatura horizontal en la poza.	32
Figura 19. Campo de temperatura para tierra cercana a la poza.	33
Figura 20. Campo de temperatura para salmuera en la poza y tierra cercana.	33
Figura 21. Residuos para Malla Media, obtenido de Ansys Fluent.	34
Figura 22. Bordes considerados para balance térmico.	35
Figura 23. Geometría de recinto cerrado para estudio de convección, relación de aspecto de 5:1, medidas en [m].	37
Figura 24. Geometría de recinto cerrado para estudio de convección, relación de aspecto de 10:1, medidas en [m].	38
Figura 25. Geometría de recinto cerrad para estudio de convección, relación de aspecto 20:0,6. Medidas en [m].	38
Figura 26. Campo de velocidades para modelo con relación de aspecto 5:1.	42
Figura 27. Campo vectorial de velocidades para el modelo con relación de aspecto de 5:1.	43
Figura 28. Campo de densidad para el modelo con relación de aspecto de 5:1.	44
Figura 29. Campo de temperatura para el modelo con relación de aspecto de 5:1.	45
Figura 30. (a) Perfil de temperatura en la línea media vertical de la geometría. (b) Perfil de temperatura de la zona interior, sin considerar las zonas cercanas a los bordes.	46
Figura 31. Gráfico de velocidad vertical del fluido para el modelo de relación de aspecto 5:1.	47
Figura 32. Campo de velocidades para modelo con relación de aspecto 10:1.	48
Figura 33. Campo vectorial de velocidades para modelo con relación de aspecto 10:1.	48
Figura 34. Campo de densidades para el modelo con relación de aspecto de 10:1.	49
Figura 35. Campo de temperaturas para el modelo con relación de aspecto de 10:1.	49
Figura 36. Gráfico de velocidad vertical del fluido para el modelo de relación de aspecto 10:1.	50
Figura 37. Campo de velocidades para modelo con relación de aspecto 20:0,6.	51



Figura 38. Campo vectorial de velocidades para modelo con relación de aspecto 20:0,6. ....	51
Figura 39. Campo de densidades para modelo con relación de aspecto 20:0,6. ....	52
Figura 40. Campo de temperaturas para el modelo con relación de aspecto de 20:0,6. ....	52
Figura 41. Gráfico de velocidad vertical del fluido para el modelo de relación de aspecto 20:0,6. ....	53

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes generales

Una poza solar consiste en una piscina de grandes dimensiones cuya función principal es actuar como colector de energía solar y además de almacenaje de ésta. Esto se logra mediante la absorción de radiación solar en la solución salina dentro de la poza. Esta solución salina presenta variaciones en su concentración para distintas zonas de la poza. El interior de la poza se subdivide en 3 zonas importantes según su nivel de concentración salina:

- Zona convectiva superior (ZCS): Presenta una baja concentración salina, en esta zona se presentan bajas temperaturas. La UCZ es una capa delgada, en esta zona se presenta convección natural.
- Zona no convectiva (ZNC): Presenta tanto gradiente de temperatura como de concentración salina. La temperatura y la concentración salina presentan un comportamiento lineal en función de la profundidad.
- Zona convectiva inferior (ZCI): Presenta una alta concentración salina y alta temperatura. En esta zona se presenta convección natural.

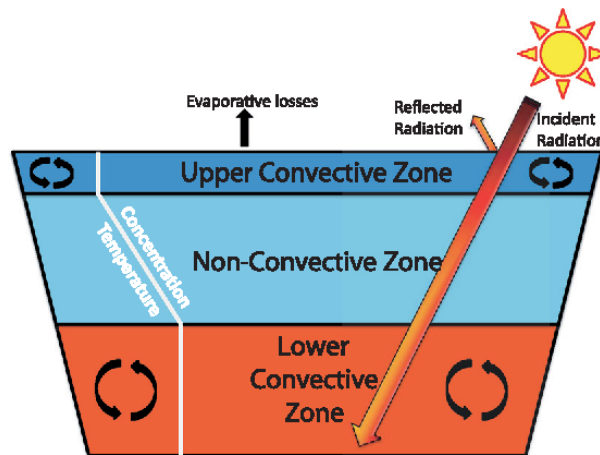


Figura 1. Esquema representativo de una Poza Solar [16].

El calor obtenido mediante el uso de poza solar puede ser utilizado para procesos industriales, sistemas de calefacción, desalinización, entre otros. Existen diversos métodos para lograr la extracción del calor de la poza, cabe destacar que la zona convectiva inferior es la que presenta la mayor temperatura, por lo tanto, es la zona desde la cual se realiza la extracción.

El primer registro sobre estos sistemas se dio en Hungría en 1902, donde se descubrió un lago con temperaturas de 70°C en su fondo. Este fenómeno fue generado debido al gradiente de concentración salino en su interior. Desde entonces se realizan numerosos estudios en torno a la implementación de pozas solares [10].

## **1.2 Motivación**

En Chile, la industria minera presenta diversos procesos de extracción hidrometalúrgica que demandan agua a temperatura moderada (60 - 80 °C), la cual podría ser suministrada por una poza solar debido al rango de temperaturas que éstas pueden alcanzar. Además, las instalaciones mineras presentan una alta concentración en el norte del país, comprendida entre las latitudes 18° a 24° Sur. Entre las latitudes anteriormente señaladas, se registran algunas de las zonas con mayor radiación solar a nivel mundial, y además se cuenta con cielos con alta transparencia atmosférica, la cual se mantiene por al menos 11 meses del año [6].

Previo a la construcción e implementación de una poza solar de escala industrial, es necesario realizar un estudio asociado al desempeño que presentará la poza solar. Para esto, se opta por la fabricación de una poza solar experimental, con la cual se realizan los estudios que permiten evaluar la viabilidad tanto económica como funcional del proyecto. La fabricación de una poza solar de escala industrial presenta un alto costo de fabricación e implementación, además de utilizar grandes cantidades de agua que, para una instalación en el norte de Chile, presenta mayor relevancia debido a su aridez.

De lo anterior, surge la necesidad de determinar la geometría y las dimensiones mínimas para las cuales la poza solar experimental pueda reflejar el comportamiento de una poza a escala industrial. De esta forma, se espera una disminución en los gastos asociados al estudio de prefactibilidad del proyecto.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

El objetivo general del presente trabajo es especificar las dimensiones apropiadas para una poza solar experimental que, operando en el norte de Chile, sirva de soporte al diseño de pozas de escala industrial.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información sobre diseño y operación de pozas solares.
- Identificar criterios y características principales que debe cumplir un modelo experimental para que sea representativo del proceso real.
- Utilizar técnicas de modelación para evaluar y elegir modelos según criterios seleccionados.
- Elaborar y estudiar los modelos para la poza solar experimental.
- Utilizar los modelos para proponer las dimensiones características de la poza experimental representativa.

## 1.4 Alcances

El estudio corresponde a un análisis detallado del comportamiento del estado final de las propiedades de mayor importancia de la poza, donde el mayor enfoque se asocia a la incidencia del tamaño de la sección de la poza en la formación del gradiente de concentración y de temperatura necesaria para alcanzar el estado pseudo-estacionario.

Es importante destacar que, en este estudio no se considera la etapa de extracción de calor desde la poza, ya que este proceso es realizado una vez desarrollado el estado pseudo-estacionario de la poza solar, el cual, si bien presenta variaciones temporales asociadas a la estacionalidad de las condiciones ambientales, cumple con ser periódico, asociado a las distintas estaciones del año y al ciclo diario. El propósito final de este estudio se enfoca en determinar la geometría necesaria para que la poza solar experimental, fabricada con las menores dimensiones posibles, logre mostrar un desempeño representativo del comportamiento que tendría una poza solar real.

Con respecto a las simulaciones de los modelos de poza experimental, éstas serán de tipo bidimensional (2D), a modo de aprovechar la simetría de la poza y así simplificar el cálculo computacional.

## **2 ANTECEDENTES**

### **2.1 Características de pozas solares existentes**

Las dimensiones de las pozas solares existentes son diversas, presentando áreas superficiales que rondan desde los cientos de metros cuadrados hasta los miles de metros cuadrados [2]. La profundidad de las pozas solares se encuentra entre 1 a 5 metros [3]. Con respecto a la geometría de las piscinas existentes, es posible encontrar diversos diseños como cilíndricas, cuadradas, troncocónicas, de sección trapezoidal, entre otras.

Las pozas solares pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones, entre las más comunes se encuentra la producción de calor para procesos industriales, desalinización, obtención de sales y generación de energía eléctrica [3].

Las pozas solares pueden alcanzar temperaturas de hasta 99 °C en su zona más profunda [6]. Esto se debe a la particularidad del gradiente, tanto de temperatura y de concentración, que se generan en su interior, lo que favorece la absorción de considerables cantidades de radiación y permite su almacenamiento por un tiempo prolongado en la zona de mayor profundidad de la poza.

Los materiales utilizados para su fabricación pueden variar según el tipo de suelo y rango de temperaturas que se desea alcanzar. Para el recubrimiento de la superficie de la poza se utilizan revestimientos de membrana sensible, de arcilla o plástico compactado, de arcilla geosintético, entre otros [3]. Para el recubrimiento de las paredes y el fondo de la poza se utilizan materiales como tierra compactada o simplemente arena y polvo decantada en el fondo de la poza, lo cual protege el revestimiento de daños por radiación.

### **2.2 Solución salina y concentración según estrato**

El fluido utilizado generalmente corresponde a una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl), también se utilizan cloruro de magnesio, nitrato de potasio, nitrato de amonio, donde las concentraciones salinas dependen de la capa de la poza. La solución debe cumplir la condición de estabilidad para los gradientes de concentración en cada zona [4].

Los rangos de concentración salina utilizados generalmente para cada estrato son: para la Zona Convectiva Superior (ZCS) inferior al 10% en masa de sal, para la Zona Convectiva Inferior (ZCI) entre un 20 a 25% en masa de sal, para la Zona No Convectiva se considera una variación de concentración y de temperatura lineal en función de la altura [5].

### **2.3 Temperaturas en cada estrato**

La zona convectiva inferior puede alcanzar temperaturas comprendidas entre 50 a 100 °C aproximadamente. Una de las particularidades del almacenamiento de calor en las pozas solares es que logran mantener estas altas temperaturas en la zona inferior incluso durante la noche.

El comportamiento del perfil de temperatura es similar al indicado para la concentración salina, es decir, la menor temperatura se encuentra en la zona convectiva superior y en la zona no convectiva se presenta un aumento lineal de la temperatura según la profundidad.

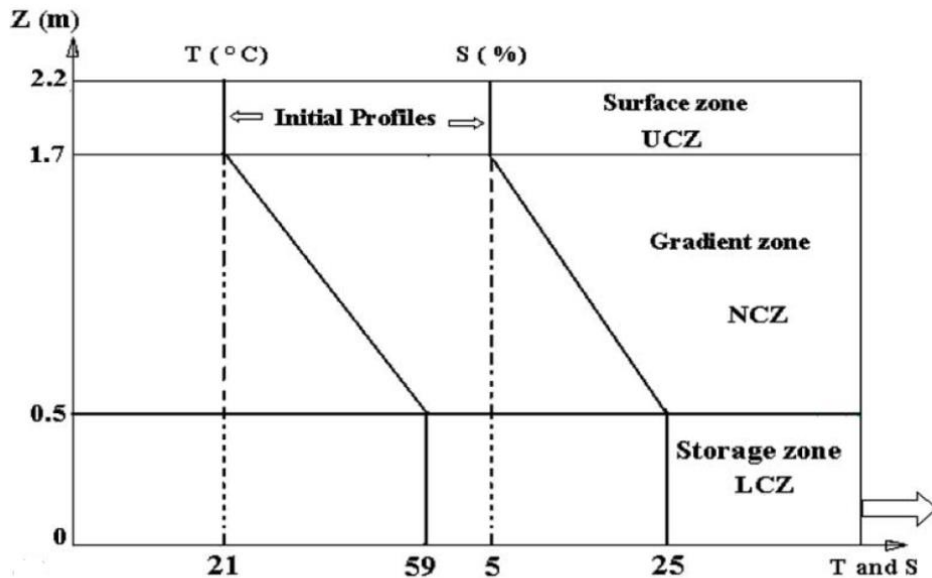


Figura 2. Ejemplo de perfil de temperatura y concentración salina para una poza solar [7].

## 2.4 Generación de gradiente de concentración

Al momento de llenado de la poza, se busca generar el gradiente de concentración de manera artificial. Para esto, existen diversas técnicas que permiten crear el gradiente de concentración necesario. Generalmente, en una primera instancia se llena la piscina con la concentración de la Zona Convectiva Inferior (ZCI) hasta el nivel deseado, luego se rellena mediante capas de distinta concentración para lograr el gradiente de la Zona No Convectiva (ZNC). Este llenado por capas se puede realizar mediante un disco flotante que permite una distribución uniforme de concentración al contar con agujeros distribuidos en la superficie de llenado, este proceso de llenado por capas se realiza hasta alcanzar el nivel requerido para la zona no convectiva. Finalmente, se llena la poza con la concentración de la Zona Convectiva Superior (ZCS) hasta alcanzar el nivel final de la poza solar [1]. Con el gradiente de salinidad formado de manera artificial se debe esperar a que se forme el gradiente de temperatura, lo que puede llegar a demorar un año [10].

Existen diversos factores que pueden alterar el gradiente de concentración salina una vez llenada la poza en su totalidad, por ejemplo, puede ocurrir el fenómeno de evaporación en la zona convectiva superior, lo que genera un aumento en la concentración salina de dicho estrato, por otro lado, existe difusión en la interfaz de zonas con distinta concentración, aumentando la concentración en las zonas que presentan menor concentración salina.

## 2.5 Ecuaciones fundamentales

Para realizar un balance energético a nivel macroscópico de la poza solar, se deben considerar las distintas interacciones como: conducción de calor hacia las paredes de la poza, calor asociado a la radiación solar incidente, calor reflejado en la superficie de la poza asociado a la radiación, convección entre la superficie de la poza y el aire exterior, evaporación en la zona superior de la poza.

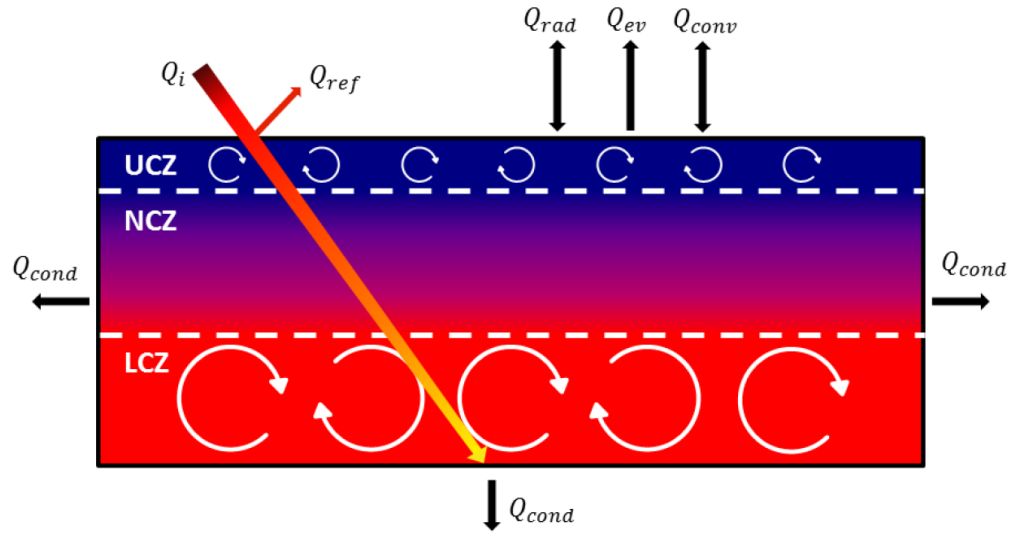


Figura 3. Esquema del balance energético de una Poza Solar [1].

A continuación, se presentan las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los fluidos al interior de la poza solar [5]:

Conservación de masa total:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.1)$$

Donde:

$\rho$ : densidad [ $kg/m^3$ ]

$t$ : tiempo [s]

$V$ : Velocidad [m/s]

Conservación de masa de cada componente:

$$\frac{\partial (\rho X_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V X_i) = \nabla \cdot (\rho D \nabla X_i) \quad (2.2)$$

Donde:

$X_i$ : fracción másica del componente  $i$

$D$ : Coeficiente de difusión [ $m^2/s$ ]

$V$  = velocidad [ $m/s$ ]

Densidad en función de la temperatura y concentración salina:

$$\rho = \rho_r [1 - \alpha(T - T_r) + \beta(S - S_r)] \quad (2.3)$$

Donde:

$\rho_r$ : densidad de referencia [ $kg/m^3$ ]

$\alpha$ : coeficiente de expansión térmica [ $C^{-1}$ ] ( $5,24 \times 10^{-4} C^{-1}$ )

$\beta$ : coeficiente de expansión másica [ $\%^{-1}$ ] ( $6,82 \times 10^{-3} \%^{-1}$ )

$S_r$ : fracción másica de sal de referencia

$T$ : temperatura [ $C$ ]

$T_r$ : temperatura de referencia [ $C$ ]

Conservación de Momentum:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla V) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (2.4)$$

Donde:

$\mu$ : viscosidad dinámica [ $Ns/m^2$ ]

$g$ : aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ]

$P$ : presión [ $N/m^2$ ]

Conservación de energía:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (2.5)$$

Donde:

$C_p$ : calor específico a presión constante [ $J kg/C$ ]

$k$ : conductividad térmica [ $W/m C$ ]

$S_h$ : calor generado por absorción de radiación solar [ $W/m^3$ ]



La tasa de absorción volumétrica en función de la radiación incidente y el ángulo de refracción se obtiene de la expresión de Rabl y Nielsen [8]:

$$q_{abs} = q_{inc} \sum_{j=1}^4 \frac{\varepsilon_j}{\cos\theta_r} \gamma_j \exp\left[-\varepsilon_j \frac{z}{\cos\theta_r}\right] \quad (2.6)$$

Donde:

$q_{inc}$ : radiación incidente [ $W/m^3$ ]

$\varepsilon_j$ : coeficiente de extinción [ $m^{-1}$ ]

$\gamma_j$ : fracción de radiación solar absorbida

$\theta_r$ : ángulo de refracción [ $^\circ$ ]

$z$ : profundidad [m]

A continuación, en la Tabla 1 se muestra los valores de coeficientes de extinción y fracción de radiación solar absorbida según el rango de longitud de onda [6]:

Tabla 1. Valores de coeficiente de extinción y fracción de radiación solar absorbida.

Numeración (j)	Longitud de onda [ $\mu m$ ]	$\varepsilon$ [ $m^{-1}$ ]	$\gamma$
1	0.2-0.6	0.237	0.032
2	0.6-0.75	0.193	0.45
3	0.75-0.9	0.167	3
4	0.9-1.2	0.179	35

Para estudiar la estabilidad de la poza y su evolución en función del tiempo, se utiliza el parámetro de estabilidad, el cual se define según la siguiente expresión [7]:

$$F_s = \left(\frac{1}{\rho_r}\right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right) = -\alpha \frac{\partial T}{\partial z} + \beta \frac{\partial S}{\partial z} \quad (2.8)$$

Donde la poza se considera estable cuando  $F_s \leq 0$ , mientras que el caso  $F_s = 0$  corresponde a la condición de estabilidad marginal.

## **3 DESARROLLO**

### **3.1 Efectos a considerar en una poza solar**

Para realizar un análisis de las dimensiones apropiadas de una poza solar experimental hay que estudiar los efectos o fenómenos que ocurren en la poza y que determinan las escalas de longitud y tiempo que deben lograrse, siendo dependientes de las dimensiones laterales.

La idea de construir un prototipo de tamaño reducido es poder reproducir, en una instalación de costo bajo o moderado, los fenómenos significativos que ocurren en una poza solar de dimensiones laterales tales que la influencia de éstas sea pequeña o nula.

Muchos de estos efectos tienen escalas de longitud y de tiempo diferentes. Con esto resultarían escalas de longitud diferentes para los distintos fenómenos, por lo tanto, será necesario utilizar las condiciones más restrictivas. Se formularán y resolverán problemas con los cuales obtener criterios para la elección de dimensiones.

### **3.2 Fenómenos relevantes para el estudio**

#### **3.2.1 Evaporación de agua desde la superficie de la poza**

La tasa de evaporación media de una poza solar ( $\text{kg/m}^2$ ) disminuye al aumentar el área o las dimensiones laterales. Esto se asocia al efecto de saturación del aire (con vapor de agua) en las zonas centrales de la poza (zonas del interior), en donde se percibe un aumento de la humedad relativa en esas zonas, lo que provoca una disminución en la evaporación de la superficie de la poza. Para lograr este estudio, es posible desarrollar un tratamiento mediante correlaciones empíricas de la tasa de evaporación y otro a través de las ecuaciones de capa límite. El objetivo del análisis es determinar las dimensiones mínimas laterales del prototipo de poza solar a partir de las cuales deje de percibir cambios considerables en la tasa de evaporación media de la poza.

La tasa de evaporación depende de la salinidad de la solución superficial, y es menor a mayor salinidad. Como la evaporación proviene de la Zona Convectiva Superior (ZCS) y ésta es de baja salinidad (típicamente de 0 a 10%), una aproximación razonable posible es considerar que la evaporación superficial desde la poza es equivalente a la de agua pura.

#### **3.2.2 Modos de flujo en la Zona Convectiva Inferior**

Actualmente, no existen descripciones teóricas del modo de flujo en las zonas convectivas, pero se puede suponer (a partir del comportamiento habitual de capas de fluido sujetos a fuerzas de empuje), que consisten en un tren de rollos de eje horizontal. La dimensión horizontal de estos rollos es similar a la vertical (la cual corresponde al espesor de la zona). Donde, dos rollos contiguos rotan en sentido opuesto. Se podría considerar un número suficiente de estos rollos (por ejemplo, 6 a 8) lo que permitiría la obtención de un ancho de poza mínimo para el prototipo, el cual depende de la profundidad de la Zona Convectiva Inferior. Como la profundidad de la ZCI es mayor que la

de la ZCS, la primera impondrá un mayor ancho necesario a la poza, y es la que determina la dimensión de prototipo.

### **3.2.3 Modos de flujo en la Zona Convectiva Superior**

La situación es similar a la planteada para los modos de flujo en la ZCI, aunque por efecto del viento puede tener escalas de longitud horizontales mayores para los tamaños de los rollos convectivos, debido al arrastre en la superficie en contacto con el aire. Este efecto no se considerará en el presente análisis.

### **3.2.4 Perfil de temperatura en la Zona No Convectiva**

En la zona no convectiva el campo de temperatura es de tipo conductivo, es decir, hay una capa de fluido intermedia en que la temperatura presenta un perfil lineal con la dimensión vertical. La mantención de este perfil lineal de temperatura es vital para el mantenimiento de la poza. Esta condición implica idealmente que no haya gradientes horizontales de temperatura ni de salinidad. Debido a que cerca de los bordes existirá un gradiente horizontal de temperatura, se debe determinar qué dimensiones de poza permiten que ese gradiente se mantenga en una parte importante de la sección transversal de la poza.

### **3.2.5 Pérdidas de calor laterales y desde el fondo**

Las pérdidas laterales ponen un problema que puede resolverse examinando la Zona No Convectiva. Es sabido que la estabilidad del gradiente vertical es vital para la operación y sustentabilidad de la poza. En una línea horizontal trazada dentro de la zona no convectiva, la temperatura debería tener un valor uniforme. Sin embargo, las pérdidas laterales pueden alterar esta uniformidad y producir gradientes dentro de los materiales aislantes, el suelo y el fluido de la poza. Es necesario buscar la dimensión de ancho de la poza para la cual la zona tenga un porcentaje alto de su ancho (por ejemplo 90%) a una temperatura uniforme, lo cual se puede obtener de la siguiente manera:

Se considera una temperatura del orden de 90°C como condición inicial para el fluido en la ZCI. Con un ancho dado se procede a evaluar el perfil de temperatura en función de la coordenada horizontal, considerando una temperatura de suelo dada y las resistencias térmicas de los materiales de la poza. El cálculo entrega un ancho mínimo para que el efecto de las pérdidas laterales no sea importante en una parte significativa de la poza, lo que se detecta por una distribución de temperatura constante con la coordenada horizontal en las secciones centrales de la poza.

El problema de las pérdidas por el fondo se presentará cualesquiera que sean las dimensiones de la poza, y por lo tanto no será un factor determinante sobre las dimensiones del modelo experimental. Sin embargo, estas pérdidas deben ser conocidas para evaluar el balance general de energía en la poza, y deben ser equilibradas con las ganancias de calor a través de la energía solar, con las pérdidas radiativas y convectivas desde la superficie, y las pérdidas laterales.

Se pueden modelar estas pérdidas estableciendo una aproximación bidimensional en una región de análisis que incluya el entorno lateral y el suelo bajo la poza.

### 3.3 Ubicación geográfica

Se selecciona una zona de Chile para determinar las condiciones ambientales a las cuales se verá sometida la poza en estudio. La ubicación geográfica para considerar durante el desarrollo de este trabajo será en el norte de Chile, específicamente en la Región de Antofagasta. Las coordenadas del punto geográfico son Latitud: -22,81; longitud: -69,52. El punto seleccionado se encuentra en una zona de alta concentración de mineras de cobre, en efecto, las más cercanas corresponden a las mineras Sierra Gorda y Mina Spence.

El motivo de la selección de este punto en particular se debe a que corresponde a un punto que ha sido utilizado anteriormente para el estudio de pozas solares, como es el caso de la tesis elaborada por C. Riobó (2015) [10], por lo que considerar el mismo lugar de estudio ayudaría a complementar los resultados obtenidos.

En la Figura 4 se observa el mapa de la ubicación geográfica seleccionada junto con el mapa minero de Chile. En color café se muestran las minas de cobre y subproductos, en verde las minas no metálicas, y en amarillo las minas de oro:

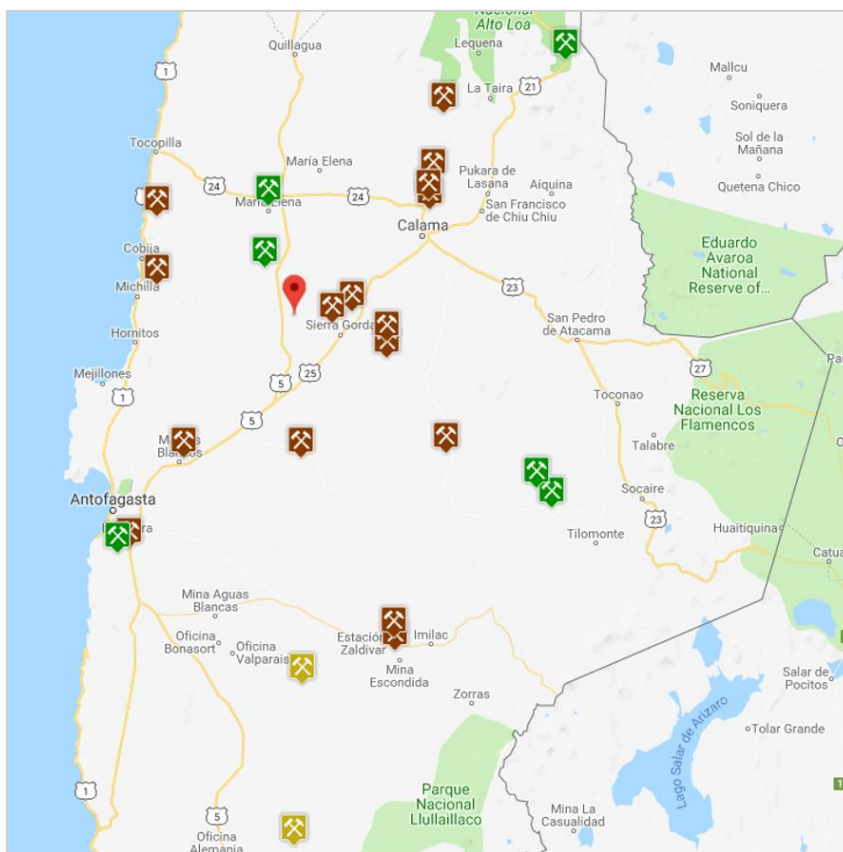


Figura 4. Ubicación geográfica de la zona de estudio y mapa terrestre de la zona [15].

Utilizando la plataforma del Explorador Solar [12], se logra obtener los valores de los principales parámetros de mayor relevancia para el estudio, como lo es la radiación incidente, la temperatura ambiente, velocidad de viento y nubosidad. Con estos datos se pretende realizar los

modelamientos a lo largo de este trabajo. De Agromet [13], se obtienen los parámetros de la humedad relativa y la temperatura de suelo superficial.

En la Tabla 2, se muestran los valores medios de diferentes condiciones ambientales relevantes de la zona.

Tabla 2. Parámetros ambientales promedio de la zona de estudio [12], [13].

Temperatura ambiental [°C]	18,9
Velocidad del viento [m/s]	4,2
Humedad relativa [%]	26,1
Temperatura de suelo superficial [°C]	14,6
Radiación Directa Horizontal [kWh/m <sup>2</sup> /día]	6,42

Los datos que se muestran en la Tabla 2 sirven para tener una primera aproximación de las condiciones ambientales a las cuales se verá sometida la poza solar al ubicarla en la zona de estudio.

Con el fin desarrollar un modelo que presente una mayor similitud al desempeño real, se utilizaran los datos de radiación incidente entregados por el TMY (Typical Meteorological Year) que comprende a datos experimentales entre los años 2004 y 2016 de la ubicación especificada anteriormente.

En el gráfico de la Figura 5. se observa la radiación directa en el plano horizontal para el período de 1 año entregada por el TMY en las coordenadas de estudio.

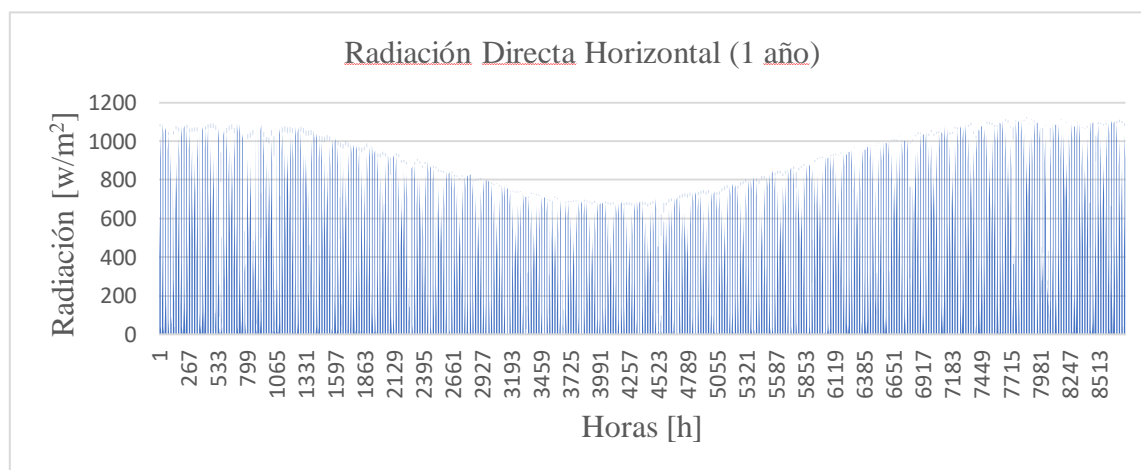


Figura 5. Radiación Directa Horizontal de 1 año para la zona de estudio [12].

Para la obtención de la fracción de radiación que efectivamente logra ser absorbida en las distintas zonas de la poza, se considera el índice de reflexión de la superficie de agua y la absorción en el resto de las zonas de la poza. Considerando un índice de reflexión de 0,06 y utilizando la absorción de radiación según la profundidad del cuerpo de agua indicado por la Tabla 1, se obtiene la distribución de la absorción de energía a partir de la radiación solar incidente en la poza, la cual

se muestra en la Figura 6. Se observa que la mayor parte de la radiación es absorbida en la Zona Convectiva Superior, siendo la de menor absorción la Zona Convectiva Inferior.

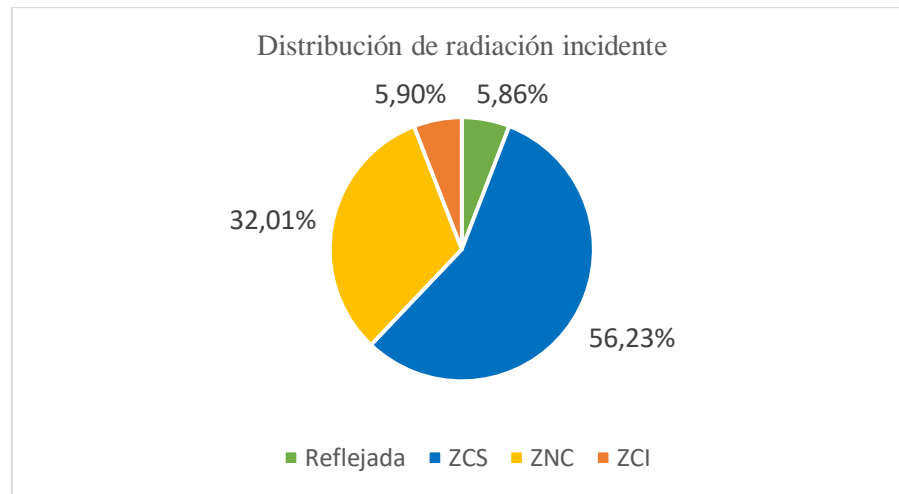


Figura 6. Distribución de absorción de energía solar incidente en la poza solar.

### 3.4 Geometría de poza solar de escala industrial

Para dimensionar la poza a escala industrial, se usará como referencia la poza de Granada, dado que corresponde a la primera poza de escala industrial diseñada, construida y puesta en operación en Europa.

La Poza Solar de Granada tiene una superficie rectangular de 500 [m<sup>2</sup>], cuyas dimensiones se detallan a continuación:

- Largo: 20 [m]
- Ancho: 25 [m]
- Profundidad: 2,2 [m]

En la Figura 7 se muestra una vista en planta de la poza solar en estudio, donde se denotan las dimensiones principales de ésta, todas las medidas se encuentran en [cm].

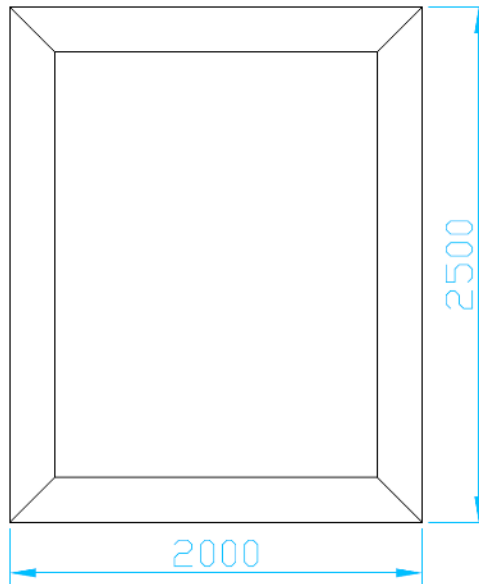


Figura 7. Vista en planta de poza solar en estudio. Medidas en [cm].

El recubrimiento utilizado para el fondo y las paredes de la poza corresponde al aislante sintético ChovAFOAM 300-M50, el cual permite prevenir pérdidas térmicas. Este material presenta una conductividad térmica de 0,034 [W/m K], espesor de 50 [mm], presión máxima de 300 [kPa] y una temperatura máxima de 65 °C [10].

En el fondo de la poza, se agrega pellet de arcilla (Arlita) hasta una altura de 50 [mm], esto asegura que el aislante quede bien protegido de las altas temperaturas de los periodos de verano en la Zona Convectiva Inferior (LCZ) [10].

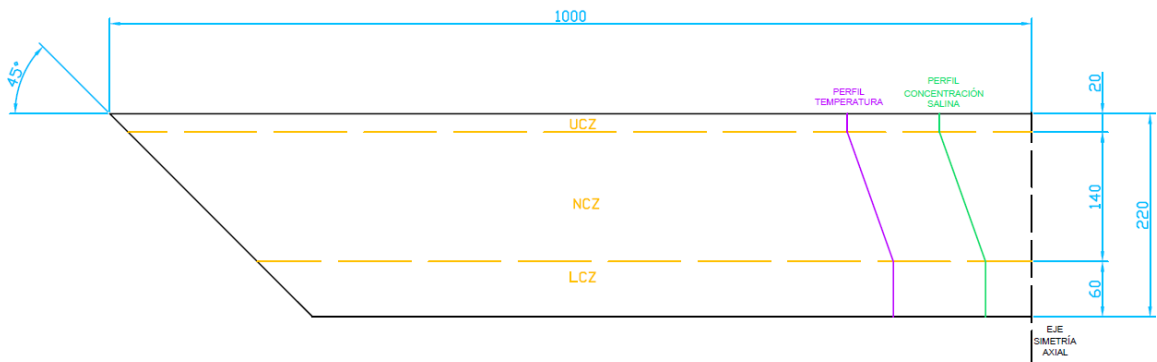


Figura 8. Sección transversal de la poza solar de Granada, España. Se esquematizan los perfiles de temperatura y concentración salina. Medidas en [cm].

Espesores de los estratos dentro de la poza solar:

- Zona Convectiva Superior (ZCS): 0,2 [m]
- Zona No Convectiva (ZNC): 1,4 [m]
- Zona Convectiva Inferior (ZCI): 0,6 [m]

### 3.5 Condiciones de operación

A continuación, se enuncian las condiciones iniciales utilizadas en la poza solar de escala industrial en Granada. Estas representan las propiedades tanto de concentración salina como de temperatura de la poza una vez finalizada su etapa de llenado. La coordenada horizontal se mide desde el extremo izquierdo superior de la poza, mientras que la coordenada vertical se mide desde la superficie, creciendo según aumenta la profundidad.

- $T(x, 0) = 20^{\circ}\text{C}$
- $T(x, 0.2) = 20^{\circ}\text{C}$
- $T(x, 1.6) = 40^{\circ}\text{C}$
- $T(x, 2.2) = 40^{\circ}\text{C}$
- $\rho(x, 0) = 1115 [\text{kg}/\text{m}^3]$
- $\rho(x, 0.2) = 1115 [\text{kg}/\text{m}^3]$
- $\rho(x, 1.6) = 1200 [\text{kg}/\text{m}^3]$
- $\rho(x, 2.2) = 1200 [\text{kg}/\text{m}^3]$

En la Figura 9 se observan los perfiles tanto de temperatura como de concentración salina en la poza solar de Granada momento de su inicio de operación. Durante su funcionamiento, en la Zona Convectiva Inferior se alcanzan temperaturas de hasta  $90^{\circ}\text{C}$  [9].

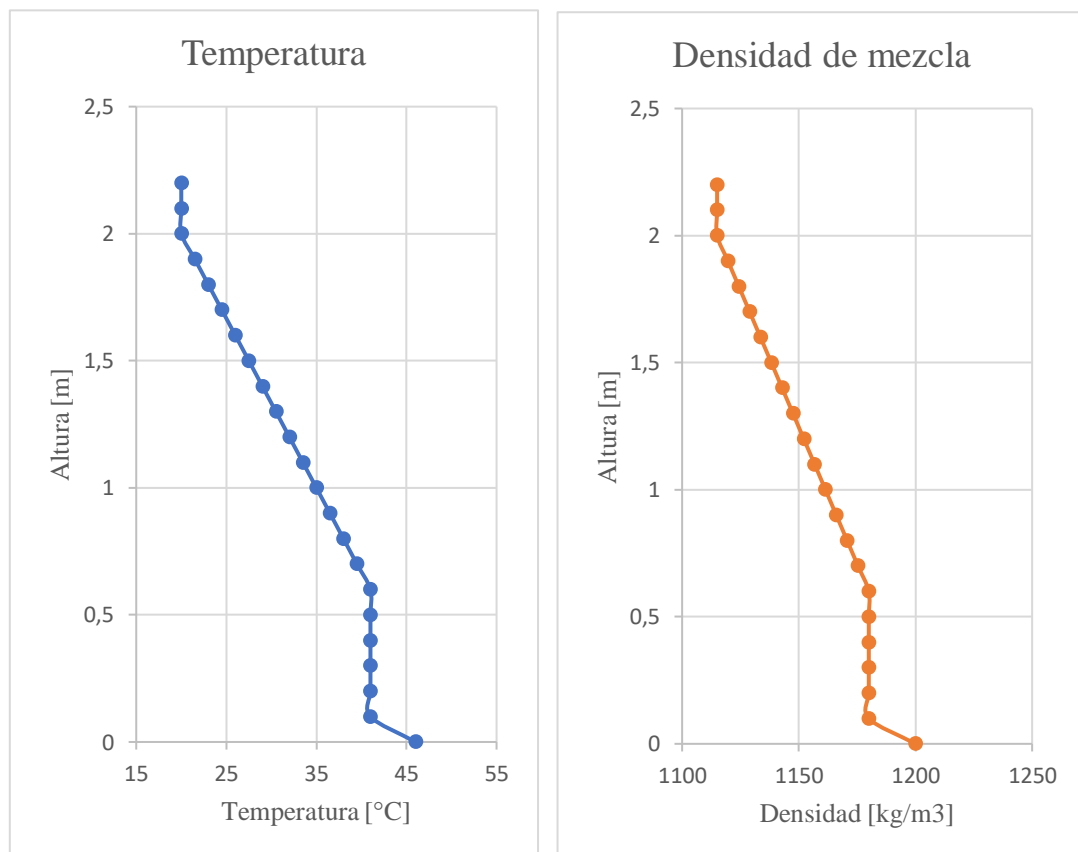


Figura 9. A la izquierda, perfil de temperatura, a la derecha, perfil de densidad de la mezcla [9].



Es importante destacar que el estudio geométrico y físico de las propiedades de la poza real de Granada se utiliza sólo de manera referencial, ya que las temperaturas y concentraciones a utilizar en el estudio pueden diferir de las anteriormente mencionadas, a modo de considerar casos críticos y más realistas para la zona de estudio en la que se enmarca el problema.

Las propiedades físicas del fluido se consideran a partir de una mezcla de agua pura con sal (NaCl), a partir de esto se enuncian las propiedades físicas de importancia en este estudio, donde  $\rho$  corresponde a densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $C_p$  a calor específico a presión constante [ $\text{J}/\text{kg K}$ ],  $k$  a conductividad [ $\text{W}/\text{m K}$ ],  $\mu$  a viscosidad dinámica [ $\text{Ns}/\text{m}^2$ ],  $\nu$  a viscosidad cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] y  $\delta$  a solubilidad [ $\text{g}/\text{L}$ ].

- $\rho_{\text{agua}} = 1000 [\text{kg}/\text{m}^3]$
- $\rho_{\text{NaCl}} = 2160 [\text{kg}/\text{m}^3]$
- $C_{p,\text{mezcla}} = 4120 [\text{J}/\text{kg K}]$
- $k_{\text{agua pura}} = 0,6 [\text{W}/\text{m K}]$
- $\mu_{\text{agua},20^\circ\text{C}} = 1,005 \times 10^{-3} [\text{Ns}/\text{m}^2]$
- $\mu_{\text{agua},40^\circ\text{C}} = 0,656 \times 10^{-3} [\text{Ns}/\text{m}^2]$
- $\nu_{\text{agua},20^\circ\text{C}} = 1,007 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$
- $\nu_{\text{agua},40^\circ\text{C}} = 0,661 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$
- $\delta_{\text{NaCl-agua},20^\circ\text{C}} = 359 [\text{g}/\text{L}] = 26,5\% \text{ peso NaCl}$

### 3.6 Cálculo de la evaporación en la ZCS

Con la finalidad de determinar la influencia de las dimensiones laterales sobre la tasa de evaporación que ocurre en la superficie de una poza solar, se realiza un análisis basado en relaciones empíricas publicadas en diversos artículos. Para la selección del método se estudia el error asociado a cada una de las relaciones utilizadas, considerando aquella que mejor se ajuste según las condiciones ambientales presentes en la zona.

Este análisis se basa en la suposición que, dada la evaporación que ocurre en la poza, el aire inmediatamente sobre la poza presenta una mayor humedad, lo que implica que existe una disminución en la tasa de evaporación asociada a la coordenada horizontal sobre la superficie de la poza, donde se espera que la mayor tasa de evaporación se obtenga en los bordes.

En primer lugar, se consideran las tasas de evaporación medias medidas en salmueras del Salar de Atacama, las cuales presentan valores de entre 3 y 6 [kg/m<sup>2</sup> día] [11], esto permite obtener un orden de magnitud de la tasa evaporativa esperable al momento de utilizar los distintos métodos de cálculo que se enuncian en la siguiente sección.

#### 3.6.1 Métodos de cálculo para la tasa de evaporación en la superficie

##### 3.6.1.1 Primer método: Procedimiento de Luisandra García [14]

Este método se basa en el uso de la Ley de Fick. Se considera el aire horizontal en la zona exterior, el cual transporta vapor de agua de manera vertical hacia la atmósfera, producto de la evaporación desde un cuerpo libre. A continuación, se muestra una expresión para el flujo de vapor de agua transportado hacia la atmósfera:

$$E = -0,622 \frac{\rho_a}{P} \kappa u_* \frac{(e(z) - e_0)}{\ln\left(\frac{z}{z_{oe}}\right)} \left[ \frac{kg}{m^2 s} \right] \quad (3.1)$$

Donde:

$\rho_a$ : densidad del aire 1,2 [kg/m<sup>3</sup>]

$P$ : presión atmosférica [kPa]

$\kappa$ : constante de von Karman 0,41

$u_*$ : velocidad de corte del viento

$z$ : rugosidad

$e(z)$ : presión de vapor de agua

$e_0$ : presión de vapor de agua para  $z_{oe}$

$z_{oe}$ : rugosidad asociada a la evaporación

Presión parcial de vapor a la altura z:

$$e(z) = \frac{HR}{100} e_s(T_a) [hPa] \quad (3.2)$$

Donde:

$HR$ : humedad relativa

$e_s$ : presión de vapor saturado

$T_a$ : Temperatura del aire

Presión de vapor saturado:

$$e_s(T) = 6,11 \exp\left(\frac{17,625T}{T + 243,04}\right) [hPa] \quad (3.3)$$

Donde:

$T$ : temperatura del aire medida en grados Celsius.

### 3.6.1.2 Segundo Método: Procedimiento de Suárez [11]

El flujo de calor evaporativo corresponde a un movimiento forzado horizontal, y se le añade otro flujo de convección natural causado por la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y el aire. Estas dos contribuciones se pueden expresar de la siguiente manera, en base a estudios empíricos anteriores:

A continuación, se muestran las expresiones que permiten calcular el calor total evacuado por evaporación a partir del calor por convección natural y forzado.

$$Q = (Q_{forzado} + Q_{natural})^{0,5} [W/m^2] \quad (3.4)$$

$$Q_{forzado} = 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot U_2 \cdot (p_{sw} - p_a) [W/m^2] \quad (3.5)$$

En una primera instancia, se ignora la convección natural a modo de considerar sólo el efecto del viento que actúa sobre la superficie de la poza.

La expresión para la presión de saturación del agua en la interfase se muestra a continuación:

$$p_{sw} = 2,1718 \cdot 10^{10} \cdot \exp\left(\frac{-4157}{T_w - 33,91}\right) [Pa] \quad (3.6)$$

Esta expresión presenta una alta precisión para temperaturas entre 0.01 y 50°C. Dado esto, se tiene la siguiente expresión alternativa, la cual presenta mayor precisión para valores de temperatura de entre 50 y 100°C.

$$p_{sw} = 1000 \cdot \exp\left(16,2886 - \frac{3816,44}{T_w - 45,98}\right) [Pa] \quad (3.7)$$

Dado que la evaporación en la poza ocurre a temperaturas cercanas a los 20 grados en promedio, se utiliza la Ecuación 3.6 para calcular la presión parcial de vapor de agua en el aire, utilizando el dato de humedad relativa.

### 3.6.1.3 Tercer método: Convección forzada

El tercer método considera una velocidad del viento, V. Cuyo coeficiente convectivo de convección forzada se expresa como:

$$h_c = 5,7 + 3,8V \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.8)$$

La expresión anterior es una formula empírica muy usada desde 1920. La transferencia de calor resultante de este coeficiente convectivo se asocia a una tasa de evaporación, la cual se expresa como:

$$\dot{m}_{evap} = \frac{h_c(p_{sw} - p_a)}{1,6 \cdot C_{p_a} P_{atm}} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (3.9)$$

El problema de este método es que no considera la capa límite formada entre la superficie de la poza y el aire, por lo que puede ser una aproximación demasiado burda o insuficiente para el problema planteado.

### 3.6.1.4 Cuarto Método: Ecuaciones de capa límite

Se considera la formación una capa límite dinámica turbulenta con el flujo de viento (de velocidad U) sobre la superficie del agua. Esta capa límite, de espesor  $\delta$ , y con coordenada “x” medida a lo largo de la poza, se caracteriza por los siguientes parámetros:

Espesor de capa límite:

$$\delta_x = 0,37 \cdot Re_x^{-0,2} [m] \quad (3.10)$$

Donde:

$\delta_x$ : espesor de capa límite según la coordenada x [m]

$Re_x$ : Número de Reynolds según la coordenada x [ad].

Donde, la expresión que permite obtener el número de Reynolds es la siguiente:

$$Re_x = \frac{U \cdot x}{\nu} \quad (3.11)$$

Donde:

$U$ : Velocidad en la dirección  $x$  suficientemente lejos de la superficie [m/s]

$\nu$ : viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ].

Número de Nusselt local:

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{k} = 0,0296 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.12)$$

Donde:

$Nu_x$ : Número de Nusselt local según la coordenada  $x$  [ad]

$h_x$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección [ $W/m^2K$ ].

$Pr$ : Número de Prandtl [ad]

Número de Nusselt promedio:

$$Nu_L = \frac{h_L \cdot L}{k} = 0,0296 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.13)$$

Número de Prandtl:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

Como estas expresiones varían en función de la coordenada horizontal, se propone determinar un largo de ensayo, que en este caso será de 2 [m]. Con esto, se compara el valor promedio de la tasa de evaporación que entrega este método que considera la capa límite turbulenta sobre la superficie de la poza.

### 3.6.2 Comparación de métodos de cálculo de evaporación

Se procede a elaborar un caso base para el cual se calcula la evaporación con los distintos métodos señalados, a modo de seleccionar aquel que presente un mejor comportamiento y así desarrollar un modelo con mayor detalle que considere el cambio de evaporación en función de la coordenada horizontal de la superficie de la poza.

Se suponen las siguientes condiciones de operación:

- Temperatura de la superficie del agua: 20 [°C]
- Temperatura del aire sobre la superficie: 20 [°C]

- Velocidad del viento: 2 [m/s]
- Humedad relativa: 30 [%]
- Presión de vapor saturado (20 [°C]): 2337,39 [Pa]
- Presión parcial de agua en el aire (HR=30 [%]): 701,217 [Pa]
- Calor latente de evaporación del agua (20 [°C]): 2.454,14 [kJ/kg]

Con esto, en la Tabla 3 se muestran las tasas de evaporación según los distintos métodos mencionados.

*Tabla 3. Tasas de evaporación obtenidas para cada método.*

Método	Tasa Evaporación [kg/m <sup>2</sup> día]
Método de Luisandra García	4,27
Método de Suárez	3,57
Convección viento	11,6
Capa límite (2 [m] de poza)	6,78

De la Tabla 3, se observa que todos los métodos se encuentran dentro del orden de magnitud que se espera para tasas de evaporación para salmueras sometidas a las condiciones de ensayo. Sin embargo, se considera que la evaporación calculada representa al valor más alto de evaporación que se presentará en la poza, ya que el estudio espera que la masa evaporada disminuya a medida que se avanza hacia el interior de la poza, dado que aumenta la humedad del aire circundante. De lo anterior, se opta por profundizar el estudio utilizando el método de capa límite turbulenta, ya que presenta un valor de 6,78 [kg/m<sup>2</sup> día] en sus primeros 2 metros, por lo que se espera que al considerar longitudes mayores pueda entregar valores de evaporación similares a los obtenidos en la literatura (3 a 6 [kg/m<sup>2</sup> día]) [11].

Se opta por descartar el método de convección de viento ya que considera una gran simplificación que no permitiría realizar grandes deducciones al considerar distintos largos horizontales de pozas solares.

### **3.6.3 Cálculo de evaporación en función del largo de la superficie de la poza**

Se selecciona el Método de Capa límite Turbulenta para desarrollar en profundidad el cálculo de evaporación en función de la coordenada horizontal de la poza solar.

Para este cálculo, se considera dividir la región ocupada por la capa límite en una gran cantidad de elementos rectangulares, de ancho  $\Delta x$  y alto  $\Delta y$ , los cuales representan el área de aire húmedo sobre la superficie de la poza. Con estos, se pretende realizar un balance de masa en cada uno de los volúmenes, para así lograr obtener nuevas condiciones de entrada para el siguiente volumen de control que se encuentre más al interior de la poza. En la Figura 10 se muestra un esquema de lo planteado.

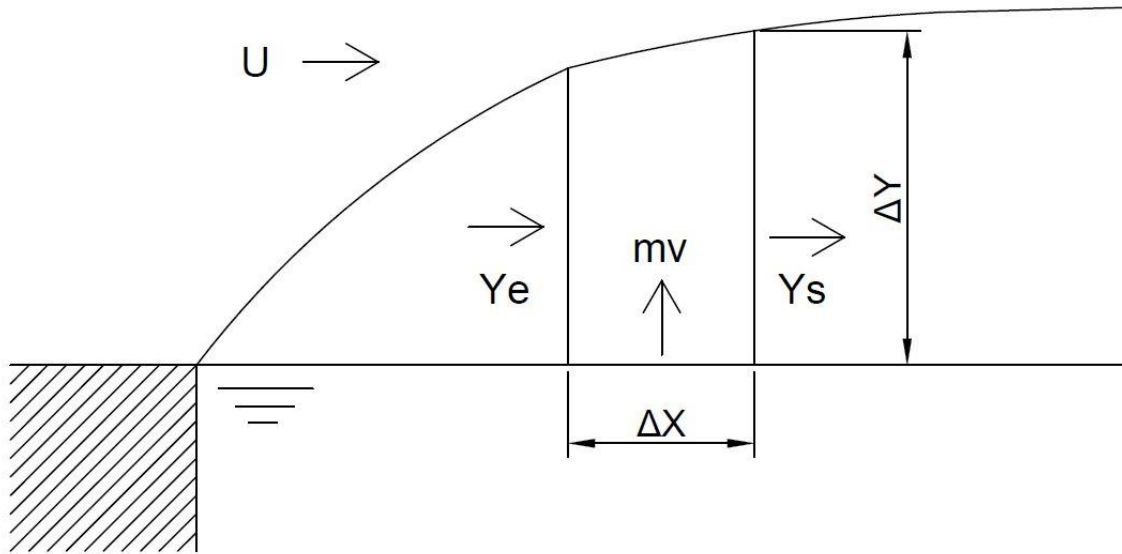


Figura 10. Esquema de elementos a utilizar para cálculo de evaporación.

El ancho del elemento a utilizar corresponde a 0,1 [m], mientras que la altura del elemento se debe seleccionar con mayor cuidado, dado que la altura seleccionada debe ser suficiente para poder asumir que el vapor liberado por la poza se absorbe completamente en el volumen de aire. Este cambio de humedad se considerará al ingresar al siguiente volumen de control.

Esta altura del elemento estará determinada por las propiedades de la capa límite del viento sobre la superficie, ya que se considera que la masa evaporada permanece dentro del espesor de la capa límite. Por lo tanto, se procede a determinar el espesor de capa límite dadas las condiciones del problema.

Como las velocidades del viento sobre la poza varían durante el día, se comparan los distintos espesores de capa límite para ciertos valores de velocidad del viento.

Se consideran números volúmenes de control de forma rectangular, los cuales presentan las siguientes dimensiones:

- Ancho ( $\Delta x$ ): 0,1 [m]
- Alto ( $\Delta y$ ): 0,5 [m]

Para el fenómeno de evaporación en la superficie de la poza solar, se opta por considerar que esto sólo influye en las pérdidas térmicas de la poza, sin afectar las pérdidas másicas. Para que esto tenga sentido, se considera que a medida que se transporta vapor de agua hacia la superficie, se agrega agua líquida a la misma temperatura en la capa superior de la poza, a modo de conservar la masa total.

### 3.6.4 Resultados tasa de evaporación

El gráfico de la Figura 11 permite determinar el espesor de capa límite que se obtiene para distintas distancias horizontales, donde se considera una longitud máxima de hasta 30 [m], a modo de considerar largos pertinentes a los de una poza solar de las características en estudio. Este espesor depende principalmente de la velocidad del viento sobre la superficie (velocidad suficientemente lejana del borde). Se comparan los espesores de capa límite para velocidades de 1 y 2 [m/s].

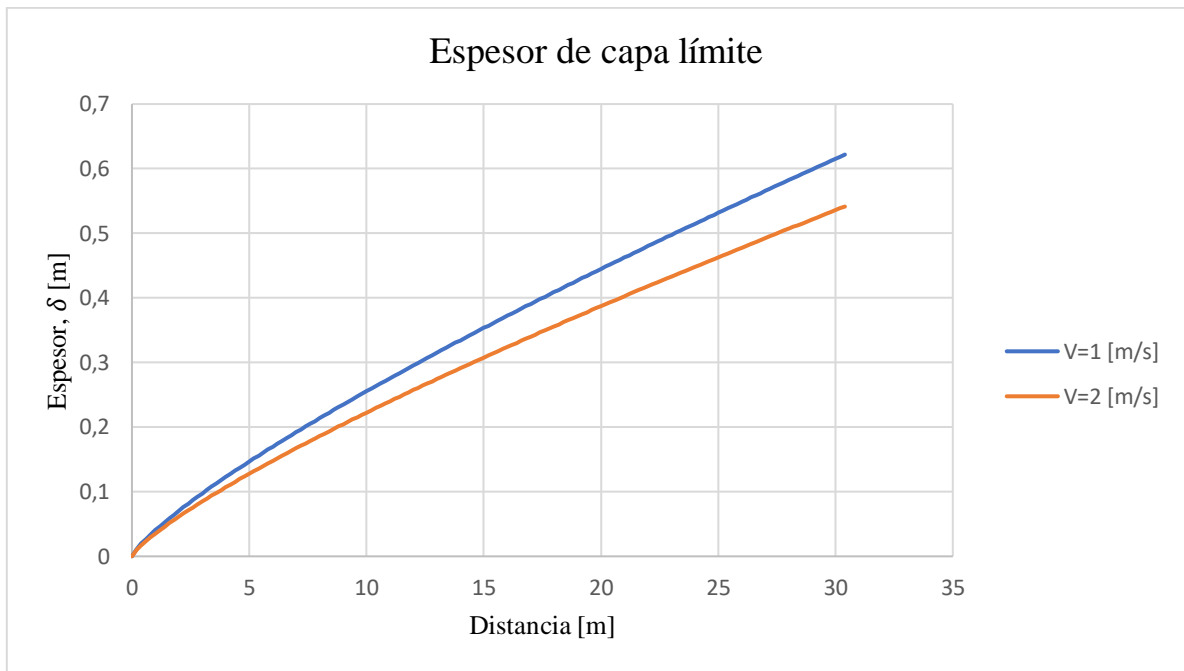


Figura 11. Espesor de capa límite de aire sobre la superficie.

Del gráfico de la Figura 11, se puede observar que para una distancia de 30 [m], se debe considerar un alto de elemento ( $\Delta y$ ) de 0,5 [m] para ambos casos de 1 y 2 [m/s]. Esto aseguraría que el vapor se mantiene dentro de la región correspondiente a la capa límite prácticamente en todo el largo y sólo avanza hacia el siguiente elemento, logrando cumplir el principio en el que se basa este estudio, que considera que lo evaporado entra de manera completa en el siguiente elemento.

Una vez obtenido el espesor adecuado para el volumen de control, se calcula la tasa de evaporación local en función de la longitud horizontal. En la Figura 12, se muestra la tasa de evaporación, donde se observa la disminución de evaporación a medida que se avanza hacia zonas interiores de la poza.



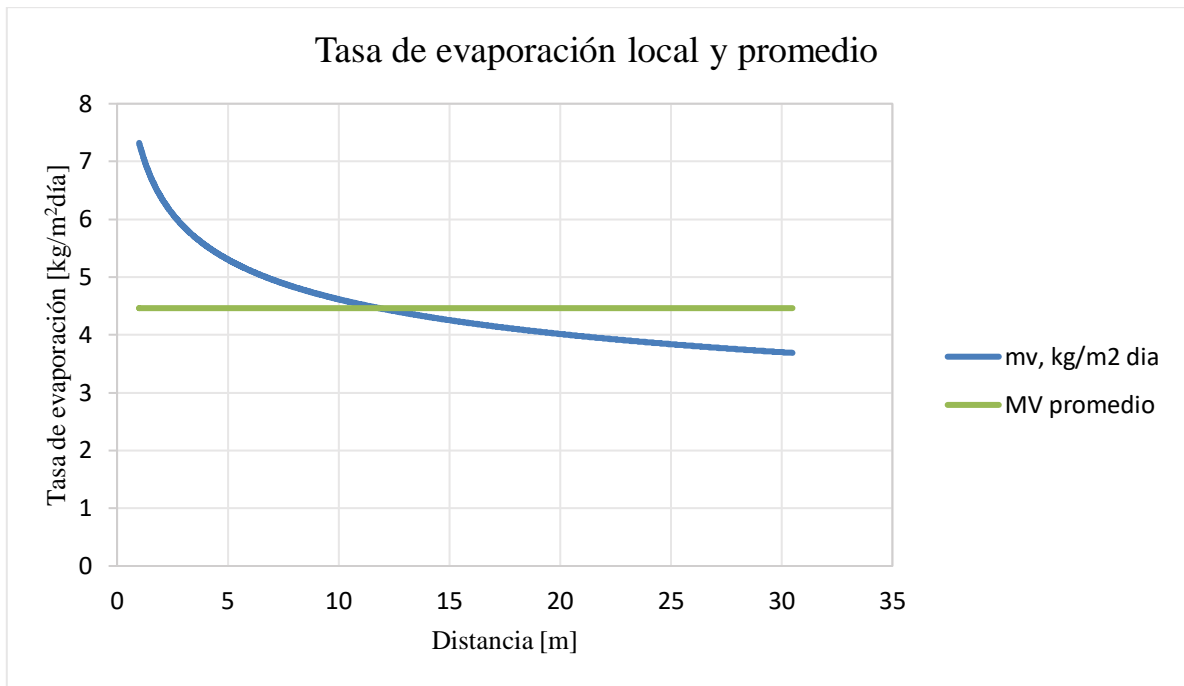
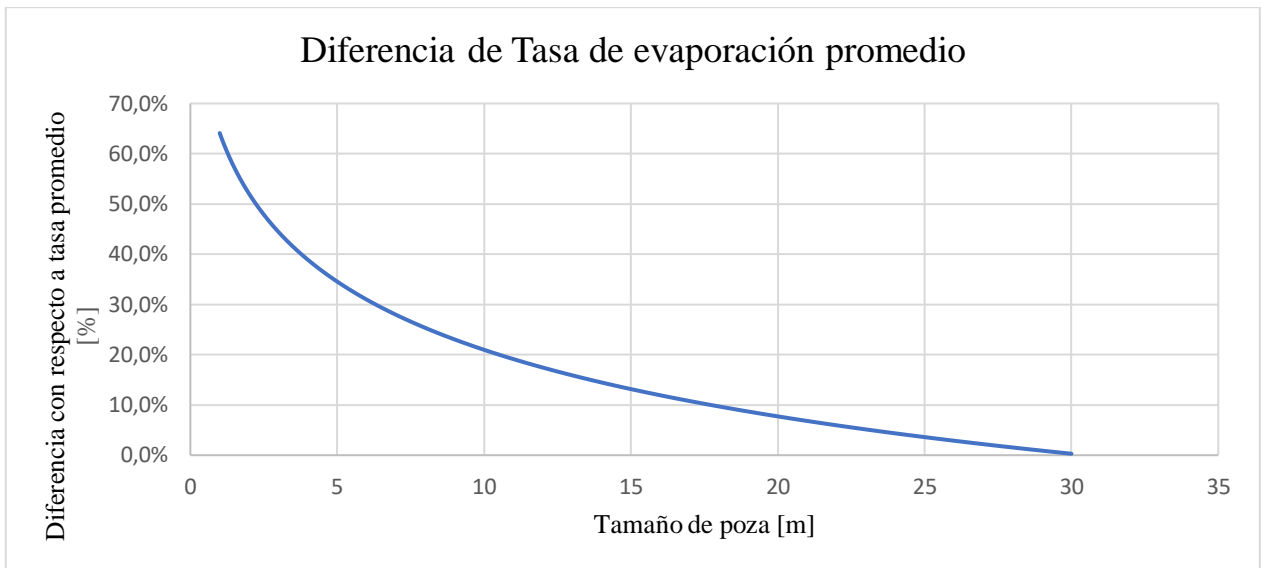


Figura 12. Tasa de evaporación desde la poza en función del avance horizontal hacia el interior de la poza.

De la Figura 12, se logra apreciar una clara disminución en la tasa de evaporación a medida que se avanza hacia zonas interiores de la poza. A pesar de que existe este descenso de tasa de evaporación, lo hace muy lentamente. Se observa que el ancho de la poza debería ser, al menos, entre 15 a 20 metros para que la tasa de evaporación no se vea afectada de manera significativa por los bordes.

Si se considera el promedio de las tasas de evaporación locales mostradas en la Figura 12 (4,46 kg/m<sup>2</sup>día), se observa que a partir de 5,2 [m] de distancia del borde las tasas locales de evaporación difieren un  $\pm 17\%$  de la tasa media. Esto indica que una poza de hasta 5 m de ancho no tiene posibilidad de representar adecuadamente el fenómeno de evaporación superficial de una poza de escala industrial.



*Figura 13. Diferencia de tasa de evaporación promedio según tamaño de la poza.*

De la Figura 13, se observa que a partir de una longitud de poza de 17,7 [m] su tasa de evaporación promedio difiere en un 10% con respecto al valor de una poza de 30 [m] de longitud, donde se puede considerar que una poza de 30 [m] representa la tasa de evaporación de una poza de tamaño real.

### 3.7 Fenómeno de conducción hacia paredes laterales

El fenómeno de conducción térmica desde la poza hacia el exterior de ésta ocurre tanto en la dirección vertical, hacia el fondo, como en la dirección horizontal, hacia las paredes laterales. Dado que este estudio intenta determinar las longitudes horizontales de la poza solar, se estudia con mayor profundidad la conducción hacia las paredes laterales, esto debido a que la conducción hacia el fondo ocurre de la misma forma en toda poza solar independiente de las longitudes horizontales seleccionadas.

Para el estudio de este fenómeno, se pueden analizar todas las zonas de la poza (ZCS, ZNC y ZCI). Se profundiza el estudio en la Zona No Convectiva dado que este estrato se encuentra prácticamente estático, lo que provoca que la transferencia de calor hacia las paredes laterales sea prácticamente sólo por conducción.

La presencia del fenómeno de convección en las zonas convectivas superior e inferior produce cambios en el coeficiente de conducción efectivo, el cual se ve representado por la siguiente expresión:

$$k_{eff} = k \cdot Nu \quad (3.14)$$

Donde,  $Nu$  corresponde al Número de Nusselt, y  $k$  corresponde al coeficiente de transferencia de calor por conducción.

Para el análisis del espesor horizontal de la capa límite térmica se utiliza la expresión adimensional de la Temperatura, la cual se muestra a continuación.

$$T_{ad}(x) = \frac{T(x) - T_{mín}}{T_{max} - T_{mín}} \quad (3.15)$$

Se utiliza esta expresión para acentuar la diferencia presente entre las temperaturas del interior y los bordes de la poza. Se considera que en el espesor de capa límite se debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$T_{ad}(x) \leq 0.99 \quad (3.16)$$

#### 3.7.1 Condiciones del modelo de conducción

Se elabora un modelo en la Plataforma de Ansys utilizando la herramienta Fluid Flow (Fluent). Donde se considera una geometría bidimensional (2D) que contempla la sección de estudio correspondiente al interior de la poza, y además el terreno cercano a ésta (aislante térmico y tierra hacia las zonas alejadas de la poza).

En la Figura 14 se muestra la forma de la geometría utilizada, con sus respectivas dimensiones:

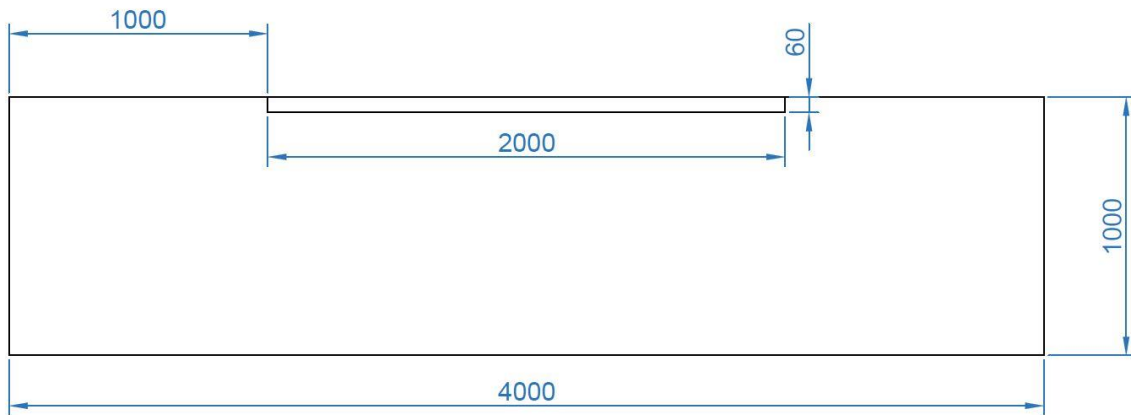


Figura 14. Geometría utilizada para el modelo de conducción en la poza, medidas en [cm].

A continuación, se listan los materiales y sus respectivas propiedades físicas utilizados en el modelo:

- Líquido:
  - Salmuera NaCl 15% peso
    - Densidad: 1108,6 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 3800 [J/kg K]
    - Conductividad: 0,6 [w/m K]
    - Viscosidad: 0,001003 [kg/ms]
- Sólidos:
  - Tierra (arcilla)
    - Densidad: 2000 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 400 [J/kg K]
    - Conductividad: 1 [w/m K]
  - Aislante
    - Densidad: 200 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 400 [J/kg K]
    - Conductividad: 0,034 [w/m K]

Para lograr una mejor comprensión de las condiciones de borde del problema, en la Figura 15 se indica cada uno de los bordes considerados en la geometría.

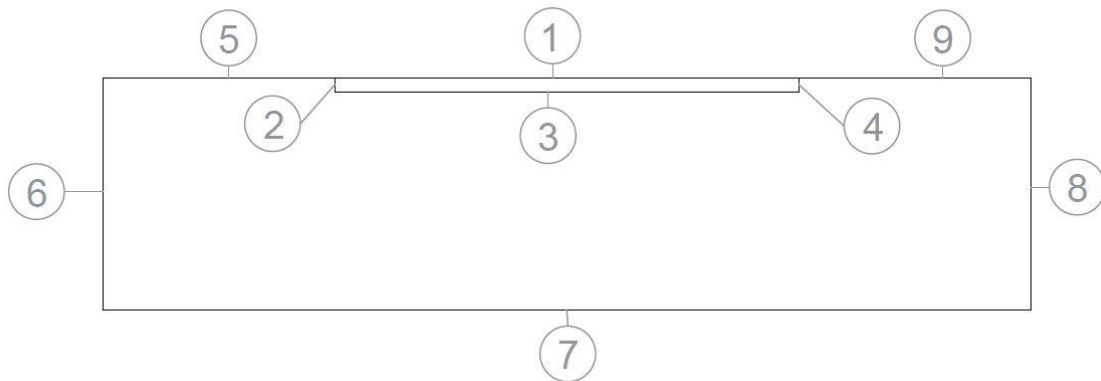


Figura 15. Identificación de bordes para la geometría del modelo de conducción.

A partir de la Figura 15, se denotan los siguientes bordes en la geometría:

- 1) Superficie de la poza
- 2) Pared lateral izquierda de la poza
- 3) Fondo de la poza
- 4) Pared lateral derecha de la poza
- 5) Superficie derecha de tierra
- 6) Pared lateral izquierda de tierra
- 7) Fondo de tierra
- 8) Pared lateral derecha de tierra
- 9) Superficie izquierda de tierra

Con esto, se definen las condiciones de borde asociadas a cada superficie:

- Pared lateral izquierda de la poza:
  - Se considera de material aislante con un espesor de 0.05 [m]
  - $\dot{Q}=0$
- Pared lateral derecha de la poza:
  - Se considera de material aislante con un espesor de 0.05 [m]
  - $\dot{Q}=0$
- Superficie de la poza (fuente emisora de energía térmica):
  - Se considera pared sin espesor.
  - Radiación con una temperatura de pared de 90 [°C].
  - Emisividad interna de 0,9.
  - Emisividad externa de 0,9.
- Fondo de la poza:
  - Se considera de material aislante con un espesor de 0.05 [m]
  - $\dot{Q}=0$

- Superficie izquierda de tierra:
  - Se considera que superficie no transmite calor al exterior.
  - Temperatura inicial del suelo 20 [°C].
  - $\dot{Q}=0$
- Superficie derecha de tierra:
  - Se considera que superficie no transmite calor al exterior.
  - Temperatura inicial del suelo 20 [°C].
  - $\dot{Q}=0$
- Pared lateral derecha de tierra:
  - Temperatura de 20[°C] (se asume distancia suficientemente lejana como para no ser influenciada por la presencia de la poza).
- Pared lateral izquierda de tierra:
  - Temperatura de 20[°C] (se asume distancia suficientemente lejana como para no ser influenciada por la presencia de la poza).
- Fondo de tierra:
  - Temperatura de 20[°C] (se asume distancia suficientemente lejana como para no ser influenciada por la presencia de la poza).

El estudio de conducción hacia paredes laterales se realiza para el caso estacionario. Esto permite determinar el perfil de temperaturas en la dirección horizontal y la temperatura de suelo (pared) cercano a la poza.

### 3.7.2 Resultados modelo de conducción

Utilizando el software Ansys Fluent, se seleccionaron 3 mallas distintas para lograr establecer independencia de malla de la solución.

A continuación, se muestran las configuraciones utilizadas para la elaboración de las mallas:

- Malla Gruesa
  - Insert → Face meshing → Quadrilaterals
  - Sizing → Curvature → Fine
  - Relevance: 100
  - Max. Face Size: 100 [mm]
- Malla Media
  - Insert → Face meshing → Quadrilaterals
  - Sizing → Curvature → Fine
  - Relevance: 100
  - Max. Face Size: 50 [mm]
- Malla Fina
  - Insert → Face meshing → Quadrilaterals
  - Sizing → Curvature → Fine
  - Relevance: 100
  - Max. Face Size: 30 [mm]

Para una comprensión visual de las mallas utilizadas, se muestran las Figura 16 y Figura 17 que detallan la malla utilizada para el Mallado Grueso. Para los casos de las mallas Malla Media y Malla Fina, su representación visual no permite distinguir el tamaño de elemento ni la forma del mallado utilizado, por lo que se opta por mostrar solo la malla asociada a Malla Gruesa.

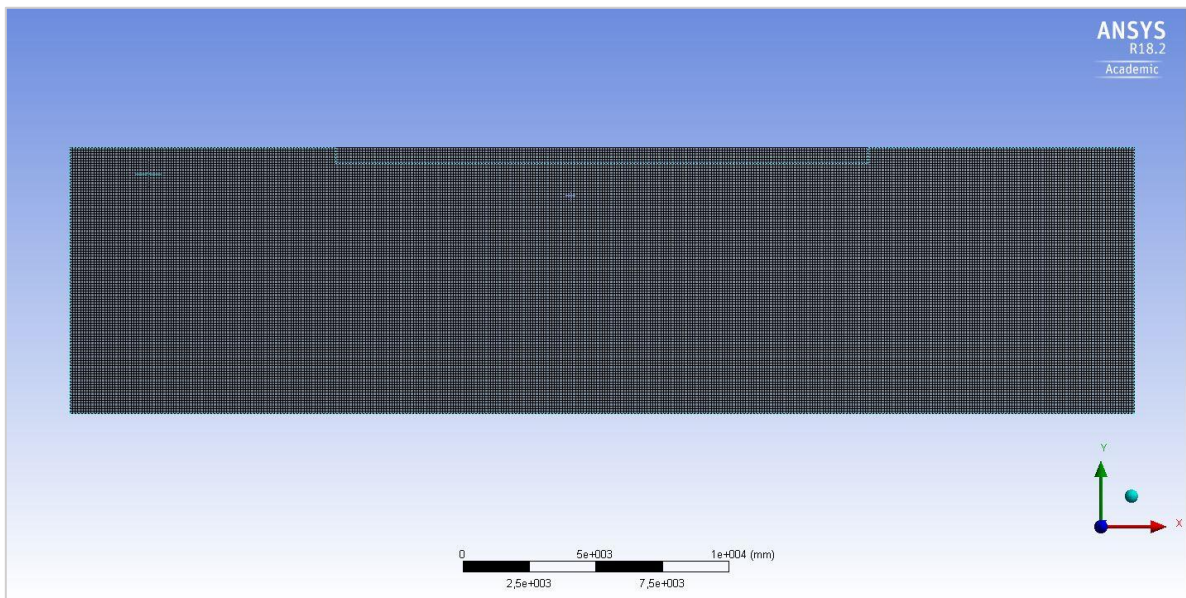


Figura 16. Malla Gruesa utilizada para estudio de fenómeno de conducción.

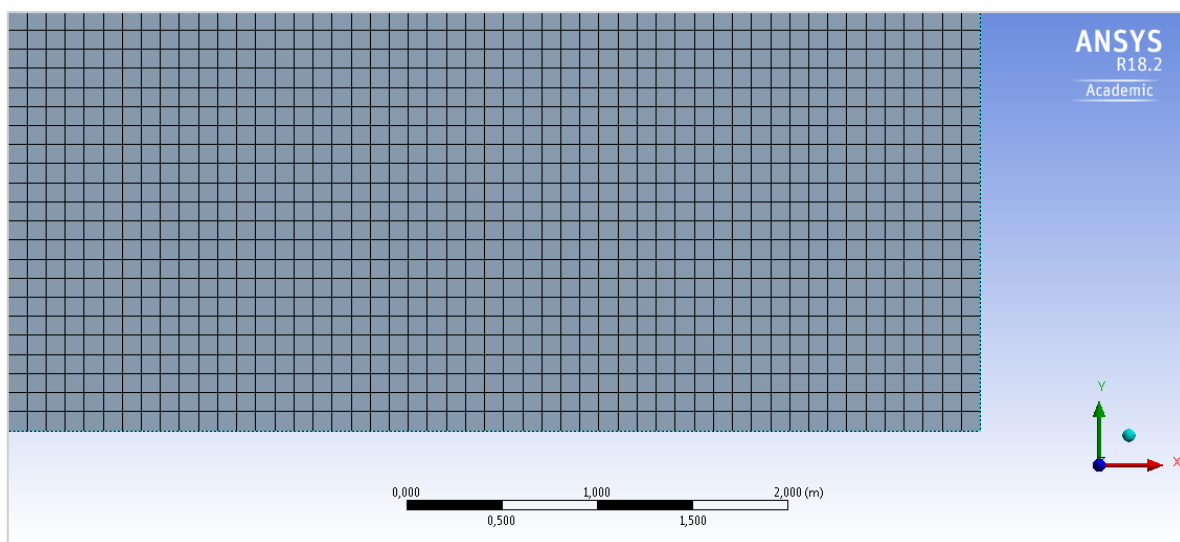


Figura 17. Vista ampliada de esquina inferior derecha de la malla utilizada para el modelo de Malla Gruesa.

Utilizando las configuraciones de mallas anteriormente mostradas, se procede a estudiar los parámetros de desempeño de la malla que entrega la misma plataforma; entre ellos se realiza principal énfasis en *Skewness* y *Orthogonal Quality*. Se considera un buen valor de *Skewness* cuando se encuentra cercano a 1, mientras que se considera un buen valor de *Orthogonal Quality* cuando éste también es cercano a 1. La Tabla 4 muestra la cantidad de nodos y elementos asociados a cada una de las mallas elaboradas, donde además se indica su factor de desempeño asociado.

Tabla 4. Parámetros de desempeño de malla.

MALLA	NODOS	ELEMENTOS	SKEWNESS AVG.	ORTHOGONAL QUALITY AVG.
Gruesa	40.501	40.000	$1,3065 \cdot 10^{-10}$	~1
Media	161.001	160.000	$1,3072 \cdot 10^{-10}$	~1
Fina	445.556	443.889	$2,4911 \cdot 10^{-4}$	~1

De la Tabla 4 se observa que tanto la cantidad de nodos como de elementos es considerablemente alta, aún para la malla gruesa, esto se debe al gran tamaño de la superficie bidimensional modelada (10 x 40 [m]), por lo que se hace necesario considerar elementos suficientemente pequeños para que logren entregar una discretización aceptable en el interior de la poza.

Por otro lado, de la misma Tabla 4 se observa que todos los valores de *Skewness Avg.* Son considerablemente cercanos a 0, mientras que todos los valores de *Orthogonal Quality* son prácticamente iguales a 1. Esto se debe a la regularidad que presenta la malla en la geometría de estudio. Es decir, dado que la geometría es perfectamente rectangular, el utilizar elementos únicamente ortogonales para la formación de la malla permite un calce prácticamente perfecto de la malla en la geometría, por lo que independiente del tamaño del mallado, presentan un desempeño considerablemente bueno.



Luego del estudio de mallado, se simula el estado estacionario para el caso de la conducción. En la Figura 18, se muestran los perfiles de temperatura obtenidos para cada una de las mallas utilizadas en este proyecto, donde se logra observar que la forma del campo es prácticamente la misma para el caso de la Malla Media y la Malla Fina, mientras que para la malla gruesa se observa un campo de temperaturas desplazado hacia temperaturas mayores. De esto, se puede decir que ya se logra la independencia de malla, por lo que basta analizar los resultados obtenidos para el caso de la Malla Media.

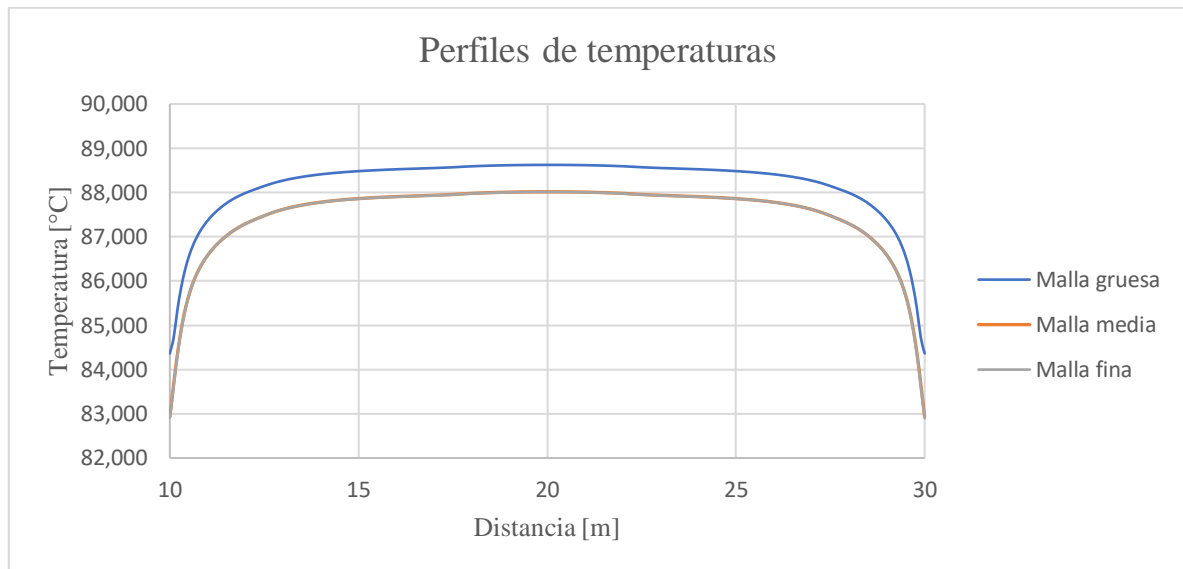


Figura 18. Gráfico de perfiles de temperatura horizontal en la poza.

En la Tabla 5 se muestran los espesores horizontales de la capa límite térmica para cada una de las mallas estudiadas. Se observa que, para el caso de la malla media, la influencia de la temperatura de las paredes se considera en un largo de 7,65 [m].

Tabla 5. Espesores de capa límite para cada malla en estudio.

Malla	Espesor capa térmica [m]	Porcentaje del largo total [%]
<b>Malla Gruesa</b>	7,7	38,5
<b>Malla Media</b>	7,65	38,25
<b>Malla Fina</b>	7,67	38,38

De la Figura 18 y de la Tabla 5, se observa que los resultados obtenidos tanto para la Malla Media como para la Malla Fina son prácticamente iguales, por lo que se decide realizar los estudios y análisis posteriores utilizando la Malla Media.

En la Figura 19 y Figura 20 se muestra el campo de temperaturas que se forma para el modelo estacionario utilizando la Malla Media. De estas Figuras, se logra apreciar la gran importancia del material aislante utilizado como separación entre el líquido de la poza y el exterior, generando una

gran diferencia de temperatura en las zonas cercanas a la pared desde el interior en comparación a las zonas cercanas a la pared por el exterior.

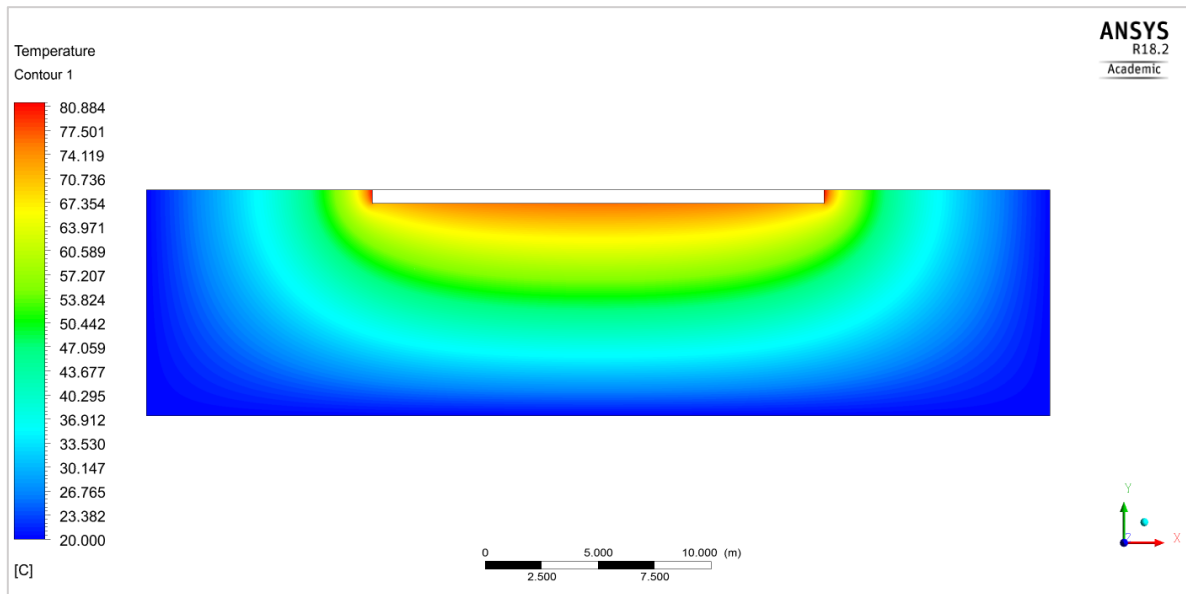


Figura 19. Campo de temperatura para tierra cercana a la poza.

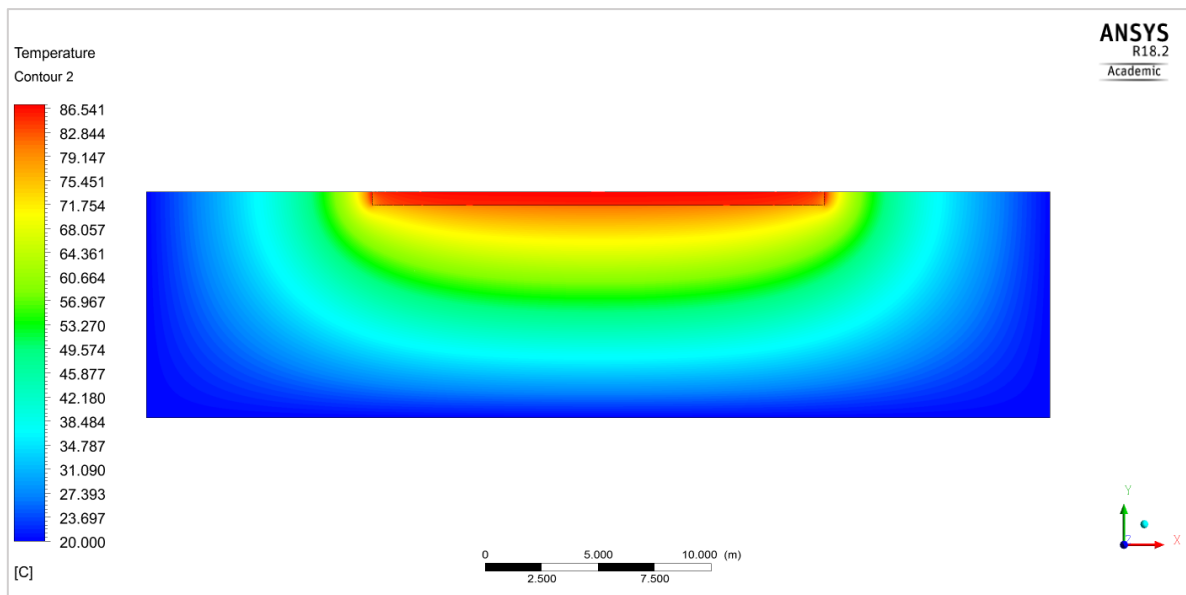


Figura 20. Campo de temperatura para salmuera en la poza y tierra cercana.

Para ratificar el correcto resultado obtenido por las simulaciones, se estudian los residuos obtenidos para los parámetros de relevancia del modelo. Estos residuos que entrega el programa corresponden a exactitud con la que se cumple cada una de las ecuaciones consideradas en el modelo. En otras palabras, entrega el error asociado según cada iteración. De lo anterior, se

considera que una solución converge cuando sus residuos son significativamente bajos (típicamente inferiores a  $10^{-3}$ ).

En la Figura 21 se muestran los valores de los residuos en función de las iteraciones realizadas para el caso de la malla media. Se observa que cerca de las 90 iteraciones se obtienen residuos inferiores a  $10^{-3}$  el cual corresponde al valor objetivo como cota superior para todos los valores de residuos monitoreados. Se puede decir que la solución converge relativamente rápido, lo cual se debe a que el problema modelado no presenta movimiento de fluido. Es decir, sólo se resuelve de manera estacionaria un problema que cuenta con una primera zona líquida estancada y una segunda zona sólida.

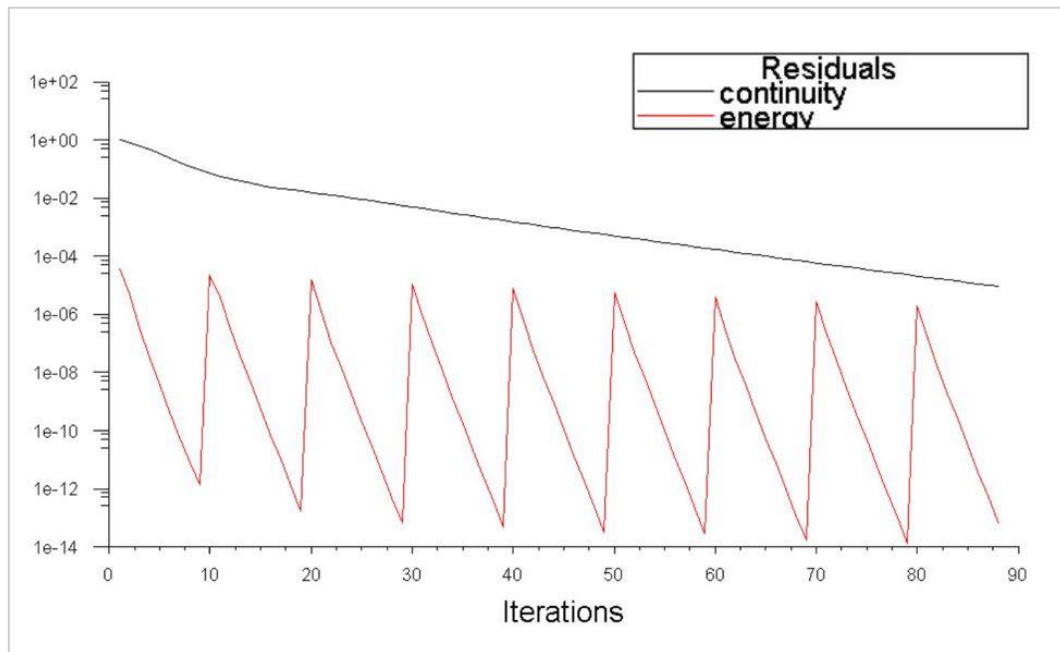


Figura 21. Residuos para Malla Media, obtenido de Ansys Fluent.

Con el propósito de validar los modelos realizados, se realiza un balance de los flujos de calor a la entrada y salida de la zona de tierra. En la Figura 22 se muestra los bordes por los cuales se registra flujo de calor en el modelo, siendo de color verde los de entrada a la zona de tierra y en rojo los de la salida de ésta. En la Tabla 6 se señalan los flujos de calor obtenidos para las paredes de la poza y para el fondo y bordes de tierra utilizados en la geometría.



Figura 22. Bordes considerados para balance térmico.

En la Tabla 6 se muestran los valores de flujos de calor por unidad de área registrados por el programa para los bordes señalados en la Figura 22, estos corresponden a los flujos promedios de cada superficie. Aquellos de signo positivo indican entrada de flujo de calor desde la poza hacia la tierra, mientras que los negativos indican salida de flujo de calor desde la tierra hacia el exterior.

Tabla 6. Flujos de calor en paredes.

Pared	Flujo de Calor [W/m <sup>2</sup> ]	Largo [m]	Flujo de Calor por superficie [W]
Pared izq. poza	36,855	0,6	22,113
Pared der. Poza	36,855	0,6	22,113
Fondo poza	7,276	20	145,517
Pared izq. tierra	-1,746	10	-17,457
Pared der. tierra	-1,746	10	-17,457
Fondo tierra	-3,733	40	-149,301

Con los resultados obtenidos a partir de la Tabla 6 se realiza el balance de la entrada y salida de calor en la zona estudiada, lo que se muestra en la Tabla 7. Se observa que sólo se registra un error inferior al 3% para el balance energético.

*Tabla 7. Tabla resumen balance de calor.*

	<b>Calor</b>
<b>Flujo entrada [W]</b>	189.742
<b>Flujo salida [W]</b>	-184.216
<b>Error [%]</b>	2,91

### 3.8 Convección en ZCS y ZCI

Como lo dice el mismo nombre de cada una de estas zonas, tanto en la Zona Convectiva Superior como en la Zona Convectiva Inferior ocurre convección natural asociado a la diferencia de temperatura en sus bordes.

Es importante considerar que se realizan estudios por separado para la convección en cada una de estas zonas, ya que se ven sometidas a condiciones de operación diferentes.

En esta sección, se estudia el comportamiento de los rollos convectivos de aquella zona que presente mayor limitación en su dirección horizontal. Dados los espesores de las ZCS y ZCI, se deduce que, para una misma longitud horizontal, deberían generarse menor cantidad de rollos en la ZCI, lo cual se debe a que esta zona presenta un mayor espesor, y en consecuencia una menor relación de aspecto. Es por lo anterior que se presenta el estudio de la convección natural en la Zona Convectiva Inferior.

Para la elaboración del modelo que permita estudiar la convección natural que se genera en la poza, se pretende estudiar zonas rectangulares que presenten distintas relaciones de aspecto asociado a sus longitudes verticales y horizontales. Se utiliza la longitud vertical asociada a la poza de estudio (0,6 metros), mientras que se estudian las relaciones de aspecto de 5:1, 10:1, y la relación de aspecto del tamaño original; 20:0,6.

En la Figura 23 se muestra la geometría utilizada para el estudio de convección en recinto cerrado que presenta una relación de aspecto de 5:1.

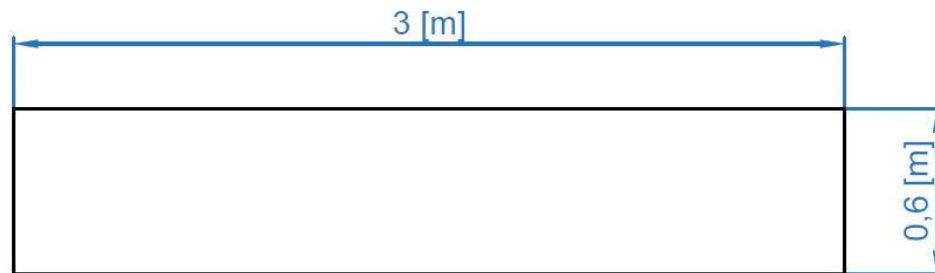


Figura 23. Geometría de recinto cerrado para estudio de convección, relación de aspecto de 5:1, medidas en [m].

En la Figura 24 se muestra la geometría utilizada para el estudio de convección en recinto cerrado que presenta una relación de aspecto de 10:1.

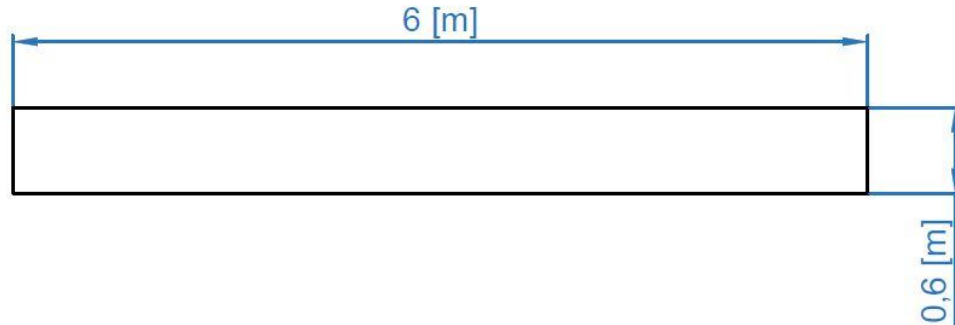


Figura 24. Geometría de recinto cerrado para estudio de convección, relación de aspecto de 10:1, medidas en [m].

Finalmente, la última geometría que se analiza corresponde a aquella con la longitud original de la poza en estudio. En la Figura 25 se muestran las dimensiones de la geometría.

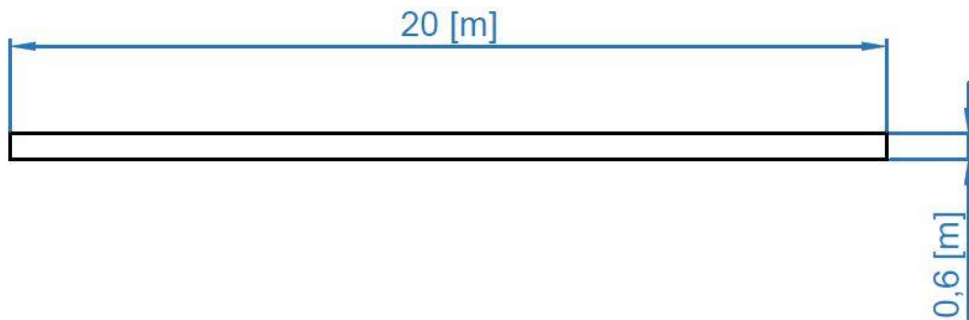


Figura 25. Geometría de recinto cerrado para estudio de convección, relación de aspecto 20:0,6. Medidas en [m].

### 3.8.1 Convección en Zona Convectiva Superior

Si bien esta zona no será considerada para la elaboración y estudio de modelos, se plantean las condiciones a las cuales se ve sometida y que permitirían elaborar las simulaciones pertinentes.

Esta zona, con respecto a sus bordes inferior y superior, interacciona con la Zona No Convectiva y con el aire exterior, respectivamente. Se considera que el viento del exterior influye en la convección que se produce en esta zona, provocando un cambio en la forma de los rollos convectivos asociados al desplazamiento de masa horizontal producido por el viento. Además, se asume que la interfaz con la Zona No Convectiva representa prácticamente una pared, ya que no

involucra intercambio másico entre las zonas y la transferencia de calor se debe a fenómeno de conducción.

Para esta zona se considera una temperatura superior de 20°C y una temperatura de interfaz con la Zona No Convectiva de 30°C. Dado que la temperatura de las paredes laterales puede presentar cambios en la dirección vertical, es preferible considerarlas simplemente con flujo de calor horizontal nulo, a modo de no generar influencias en los resultados. La concentración salina se puede considerar de un 5% en el límite superior y de un 10% en el límite inferior.

### **3.8.2 Convección en Zona Convectiva Inferior**

Esta zona interactúa con el aislante en el fondo de la poza y con las Zona No convectiva en la parte superior. Se puede considerar que este estrato representa el caso de un sistema cerrado, dado que 3 de sus bordes corresponden a paredes rígidas, mientras que la interfaz superior no presenta intercambio másico y transfiere calor solo por conducción.

Para esta zona se considera una temperatura superior de 50°C y una temperatura inferior de 90°C. Se realizan las mismas consideraciones para las paredes laterales mencionadas anteriormente. La concentración salina se puede considerar de un 15% en el límite superior y de un 26,5% en el límite inferior, el cual corresponde al valor de saturación del Cloruro de Sodio en el agua. El modelo se desarrolla en un régimen transiente, buscando estudiar un estado pseudo-estacionario que se produciría al momento de la formación de los rollos convectivos.

### **3.8.3 Parámetros del modelo**

#### **3.8.3.1 Geometrías**

Las geometrías utilizadas para los modelos corresponden a las señaladas por la Figura 23 (relación 5:1), Figura 24 (relación 10:1) y Figura 25 (relación 20:0,6).

#### **3.8.3.2 Mallas**

Dada la regularidad de las geometrías a utilizar (rectángulos), se opta por utilizar una configuración similar a la señalada en el modelo de conducción. La diferencia principal se tiene en el tamaño del elemento, dado que las geometrías a utilizar en esta sección son de menor tamaño, se utiliza un tamaño de elemento menor.

Utilizando el software Ansys Fluent, en el apartado de malla se configura la malla a utilizar de la siguiente forma:

- Insert → Face Meshing → Quadrilaterals
- Sizing → Curvature → Fine
- Relevance: 100
- Max. Face Size: 30 [mm]

Se puede apreciar que la fabricación de la malla es similar a la del caso de estudio de conducción, por lo que sus parámetros de calidad de malla son similares y se puede considerar



como una malla apropiada. Esto se debe a la regularidad de los elementos seleccionados en concordancia con la regularidad de la geometría, la cual corresponde simplemente a rectángulos.

### 3.8.3.3 *Condiciones iniciales*

En primer lugar, dado que Ansys Fluent presenta ciertas dificultades para trabajar con modelos de convección natural a partir de un estado inicial sin movimiento (estático), este estudio se realiza de forma transiente, considerando intervalos de tiempo suficientemente grandes para lograr estabilidad en los resultados obtenidos.

Uno de los elementos de mayor importancia al momento de elaborar el modelo transiente, se encuentra en la selección del paso temporal a utilizar. De la literatura, se obtiene que comúnmente se modelan situaciones de convección natural con un paso de tiempo de 1 [s].

Para corroborar que la malla seleccionada en la sección anterior logrará entregar resultados apropiados, se utiliza el número de Courant para determinar si la selección del tamaño de elemento concuerda con el paso de tiempo impuesto.

En la ecuación 3.14 se muestra la expresión que entrega el uso del Número de Courant.

$$\frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} < C \quad (3.17)$$

Donde:

*u*: velocidad [m/s]

*Δt*: tamaño de salto temporal de la simulación [s]

*Δx*: longitud del elemento de la malla [m]

*C*: Número de Courant [ad]

Se conoce que las velocidades de fluidos sometidos a convección natural en condiciones similares a las estudiadas rondan entre 0,01 y 0,1 [m/s]. De esto, considerando un valor típicamente de  $C \sim 1$ , se obtiene que tanto el paso de tiempo como el tamaño de elemento considerado se encuentran en rangos ideales para el correcto funcionamiento del modelo para casi todos los valores de velocidad registrado, siendo sólo los posibles valores máximos de velocidad de convección los que superen este criterio.

Es importante señalar que se busca realizar un balance entre el paso de tiempo, tamaño del elemento (refinamiento de malla), velocidad del fluido, y tiempo real de iteración. Lo que provoca que existan ciertos criterios que no se cumplan a cabalidad para todos los puntos de estudio, pero permite de todas formas obtener un buen desempeño del modelo.

Dentro de las características implementadas en el modelo dentro de la plataforma de Ansys Fluent, se enlistan aquellas importantes utilizadas para el modelo:

- Estado: Transiente
- Tiempo de simulación: 6 [h]
- Modelos implementados:

- Multifase (Mezcla)
- Energía
- Viscosidad (*Standard k-ε, Standard Wall Fn*)

A continuación, se enlistan los materiales y sus respectivas propiedades físicas utilizados en el modelo:

- Líquidos:
  - Salmuera NaCl 15%p.
    - Densidad: 1108,6 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 3800 [J/kg K]
    - Conductividad: 0,6 [w/m K]
    - Viscosidad: 0,001003 [kg/ms]
  - Salmuera NaCl 26,5%p. (solución saturada)
    - Densidad: 1305,93 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 3800 [J/kg K]
    - Conductividad: 0,6 [w/m K]
    - Viscosidad: 0,001003 [kg/ms]
- Sólidos:
  - Aislante
    - Densidad: 200 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 400 [J/kg K]
    - Conductividad: 0,034 [w/m K]
  - Conductor
    - Densidad: 2719 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Calor específico: 871 [J/kg K]
    - Conductividad: 202.4 [w/m K]

Se considera una temperatura inicial de la solución de 50 [°C].

Condiciones de borde:

- Pared lateral izquierda:
  - Se considera de material aislante con un espesor de 0.05 [m].
  - $\dot{Q}=0$
- Pared lateral derecha:
  - Se considera de material aislante con un espesor de 0.05 [m].
  - $\dot{Q}=0$
- Pared superior:
  - Se considera de material conductor con un espesor de 0.05 [m].
  - Temperatura de pared de 50 [°C].
- Pared inferior:
  - Se considera de material conductor con un espesor de 0.05 [m].

- Temperatura de pared de 90 [°C].

Para generar un caso que sea similar a una situación real dentro de una poza solar, se realiza una inserción de condiciones iniciales del material (“parchado” de propiedades) dentro de la sección de estudio:

- En la mitad superior del rectángulo se considera que hay sólo Salmuera NaCl 15%p.
- En la mitad superior del rectángulo se considera que hay sólo Salmuera saturada, NaCl 26,5%p.

Esto se realiza con la intención de forzar movimiento al interior del sistema, dado que existe diferencia de densidades dentro de la zona. Se espera que a medida que el fluido del interior aumenta su temperatura, se generen las convecciones esperadas.

### 3.8.4 Resultados de la zona convectiva inferior

Del modelo elaborado para el estudio de la convección en la Zona Convectiva Inferior se obtiene la formación de rollos convectivos para el caso de la geometría con relación de aspecto de 5:1; 10:1; y 20:0,6.

#### 3.8.4.1 Resultados Modelo con relación de aspecto 5:1.

En la Figura 26 se muestra el campo de velocidades obtenidos para la simulación de la geometría con relación de aspecto 5:1. En ella, se logra apreciar la formación de 1 rollo convectivo.

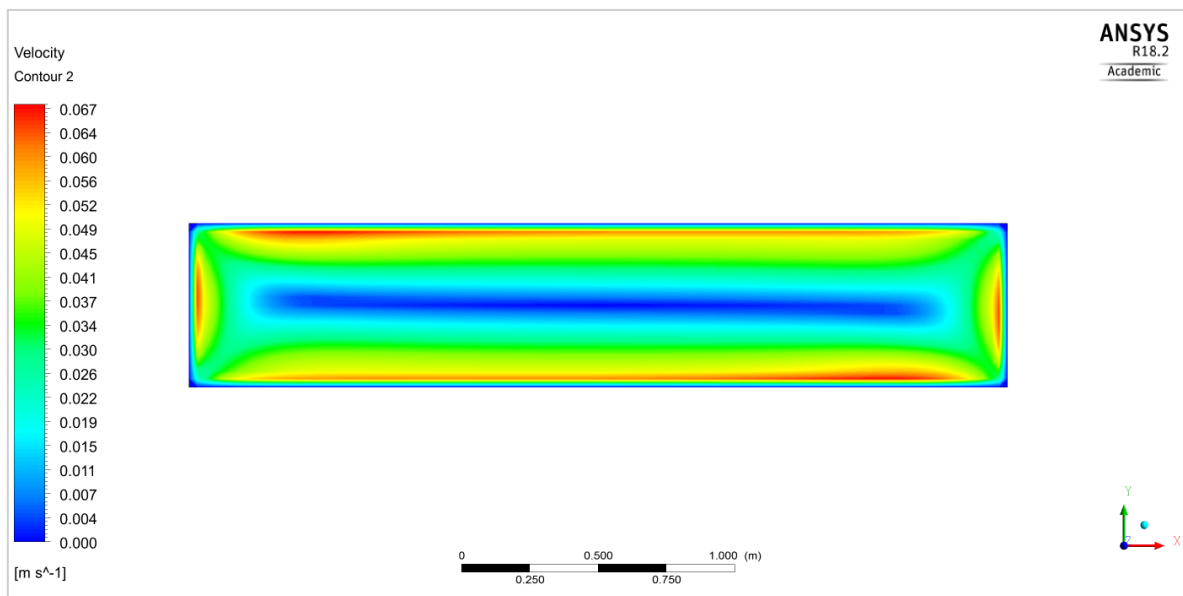


Figura 26. Campo de velocidades para modelo con relación de aspecto 5:1.

Dado que la geometría de relación 5:1 es la que presenta la menor longitud horizontal, es esperable que forma una baja cantidad de rollos convectivos (1 en este caso). De esto, se podría esperar que cualquier geometría de menor relación de aspecto también debería presentar 1 sólo

rollo convectivo, asumiendo que el modelo buscará generar rollos con la misma relación de aspecto para distintas geometrías.

Para comprender de mejor manera el comportamiento de los rollos convectivos, se muestra en la Figura 27 el campo vectorial de velocidades dentro de la zona de estudio, donde se aprecian las zonas de recirculación generadas. De esta figura, se observa que los valores máximos de velocidades alcanzados se registran en las zonas laterales, las cuales corresponden a la subida (izquierda) y bajada (derecha) del fluido. También se observa que, en las zonas de movimiento horizontal, los máximos de velocidad se muestran al comienzo del recorrido realizado por el fluido.

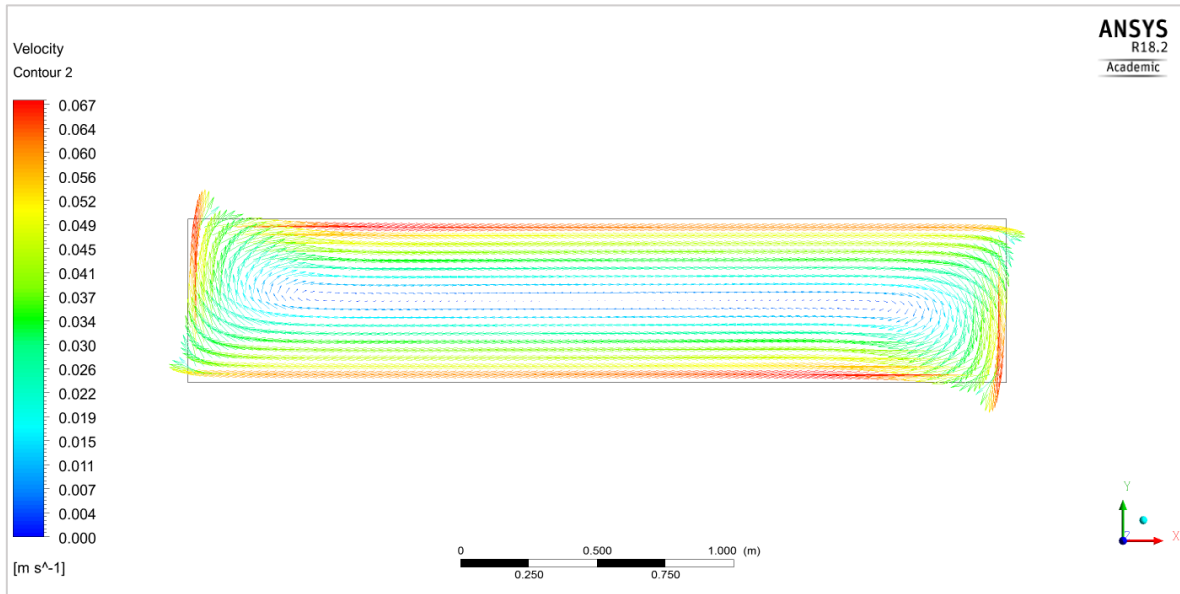


Figura 27. Campo vectorial de velocidades para el modelo con relación de aspecto de 5:1.

En la Figura 28 se muestra el campo de densidad dentro de la zona de estudio, se observa que existe una mezcla en la zona interior del rollo, mientras que se presentan diferencias leves en las esquinas opuestas (esquina inferior izquierda y esquina superior derecha). Esto se puede deber simplemente a la gravedad, ya que la zona de mayor densidad permanece en la parte baja y la de mayor densidad en la zona superior. Además, de la Figura 26 se observa que la velocidad en las esquinas es prácticamente nula, por lo que se podría pensar que estas zonas presentan fluido que no participa de la convección.

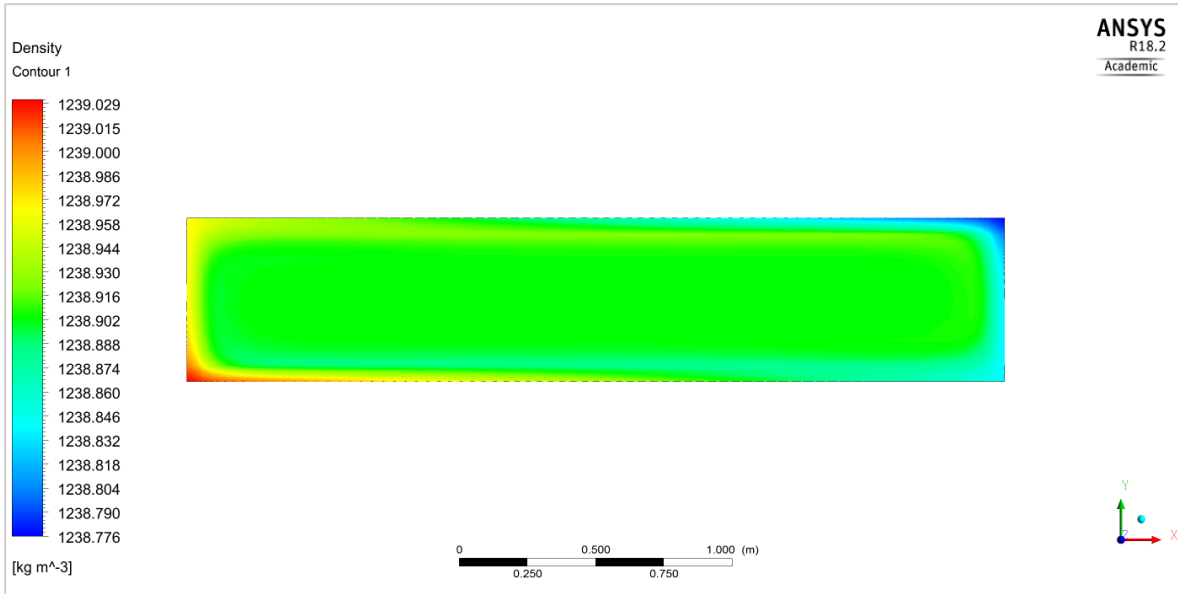


Figura 28. Campo de densidad para el modelo con relación de aspecto de 5:1.

Por otro lado, de la misma Figura 28 se aprecia una menor densidad en la zona de descenso de fluido con respecto a la densidad de la zona de ascenso. Esto se puede asociar a que, analizando una franja vertical tanto del extremo izquierdo como el derecho, se observa que se cumple el orden esperado de densidades (disminuyendo a mayor altura), lo que sustenta el movimiento esperado que produce el fenómeno de convección natural. Es importante considerar que, si bien se observan zonas con distintas densidades, su diferencia es considerablemente baja (inferior a 2 [kg/m<sup>3</sup>] para las zonas de mayor diferencia).

En la Figura 29 se muestra el campo de temperatura dentro de la zona, donde se aprecia que no existe estratificación, lo cual concuerda con lo esperado para zonas convectivas. A pesar de que los valores de temperatura de las paredes son considerablemente distintos (50 °C pared superior y 90 °C pared inferior) la influencia de estas temperaturas sólo se percibe en las zonas muy cercanas a las paredes superior e inferior. Por otro lado, considerando que existen pequeñas variaciones en la densidad dentro de la zona de estudio. Se esperaría encontrar variaciones de temperatura asociado a dichos cambios. Dicho lo anterior, puede que la escala de temperaturas no permita evidenciar dichas fluctuaciones de temperatura, ya que puede que estas sean de menor orden de magnitud que el mostrado en la Figura 29.

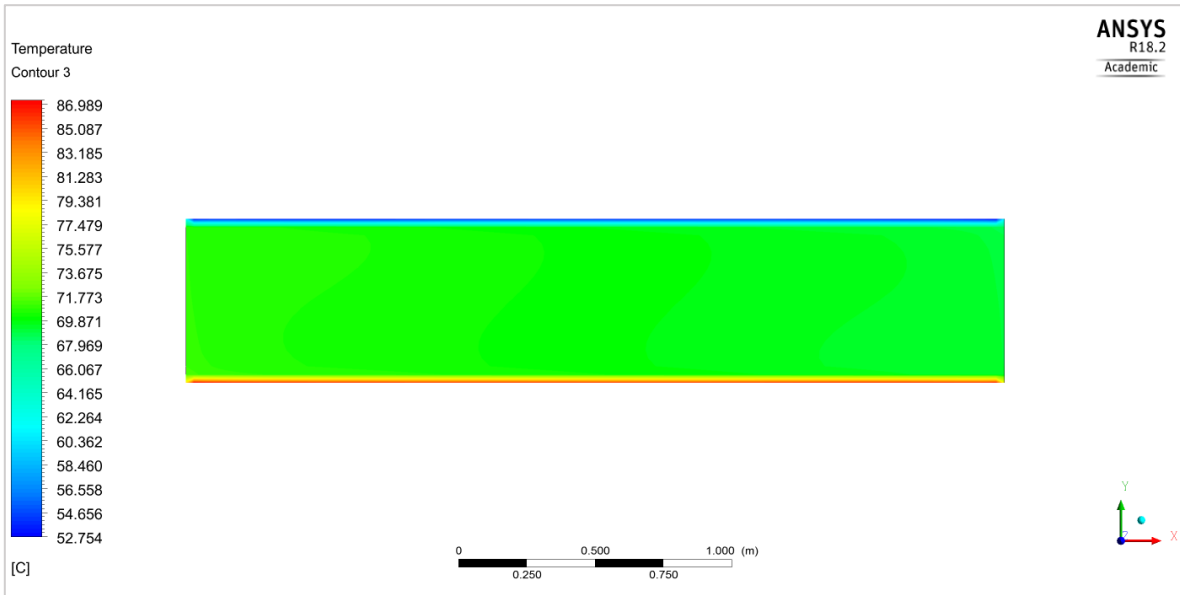


Figura 29. Campo de temperatura para el modelo con relación de aspecto de 5:1.

Para corroborar el completo mezclado del fluido dentro del recinto, se muestra en la Figura 30 el perfil de temperatura en la línea media vertical, donde se observa que la temperatura es prácticamente la misma en todo el interior, sólo presentando variaciones en las zonas cercanas a las paredes superior e inferior asociadas a las temperaturas de pared. Además, se muestra en mayor detalle la temperatura en la zona interna (sin considerar las zonas cercanas a los bordes).

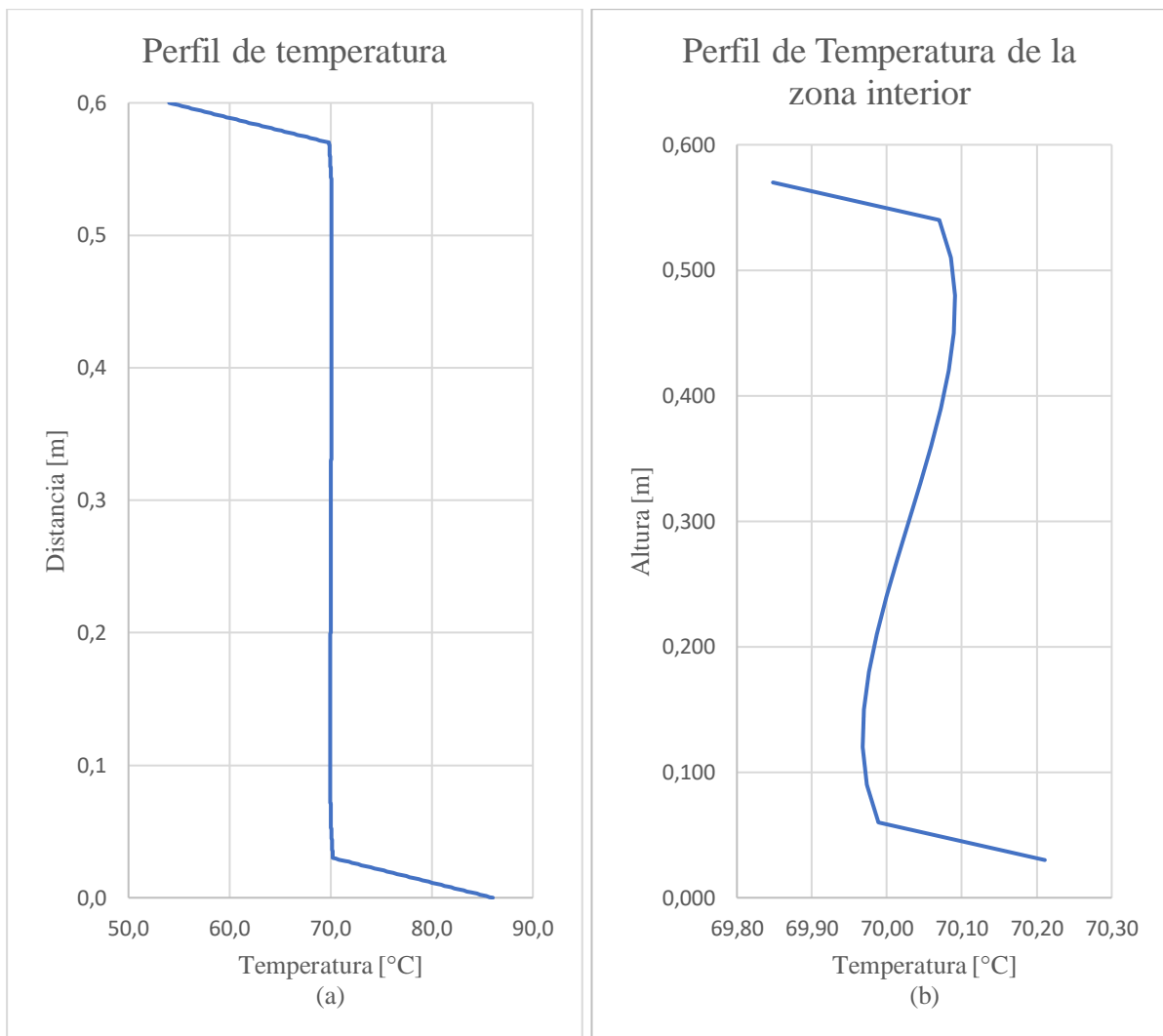


Figura 30. (a) Perfil de temperatura en la línea media vertical de la geometría. (b) Perfil de temperatura de la zona interior, sin considerar las zonas cercanas a los bordes.

A partir de la Figura 30 (a), se observa que la variación de temperatura es considerable sólo en las zonas cercanas a los extremos (lo cual considera distancias de influencia cercanas a 0,05 [m]), esto permite verificar que las zonas que presentan cambios de densidades mostrados en la Figura 28 son sólo aquellas cercanas a las paredes, dado que el resto de la zona (interior) presentan prácticamente la misma temperatura ( $\pm 0,5$  [°C] según la Figura 30 (b)), y por lo tanto, similar densidad.

De la Figura 30 (b), se observa que la mitad inferior presenta una temperatura levemente superior a la de la mitad superior, es decir, el flujo que va hacia la izquierda (zona ascendente) es de mayor temperatura que el que va hacia la izquierda (zona descendente).

Para lograr determinar el tamaño del rollo convectivo, se grafica la componente vertical de la velocidad del fluido al interior del recinto. Para este caso donde se tiene sólo un rollo convectivo puede no representar mayor relevancia, pero en el caso de existir mayor cantidad de rollos esta

gráfica presenta gran utilidad para determinar las dimensiones de éstos. En la Figura 31 se muestran las velocidades verticales del fluido para el modelo con relación de aspecto de 5:1.

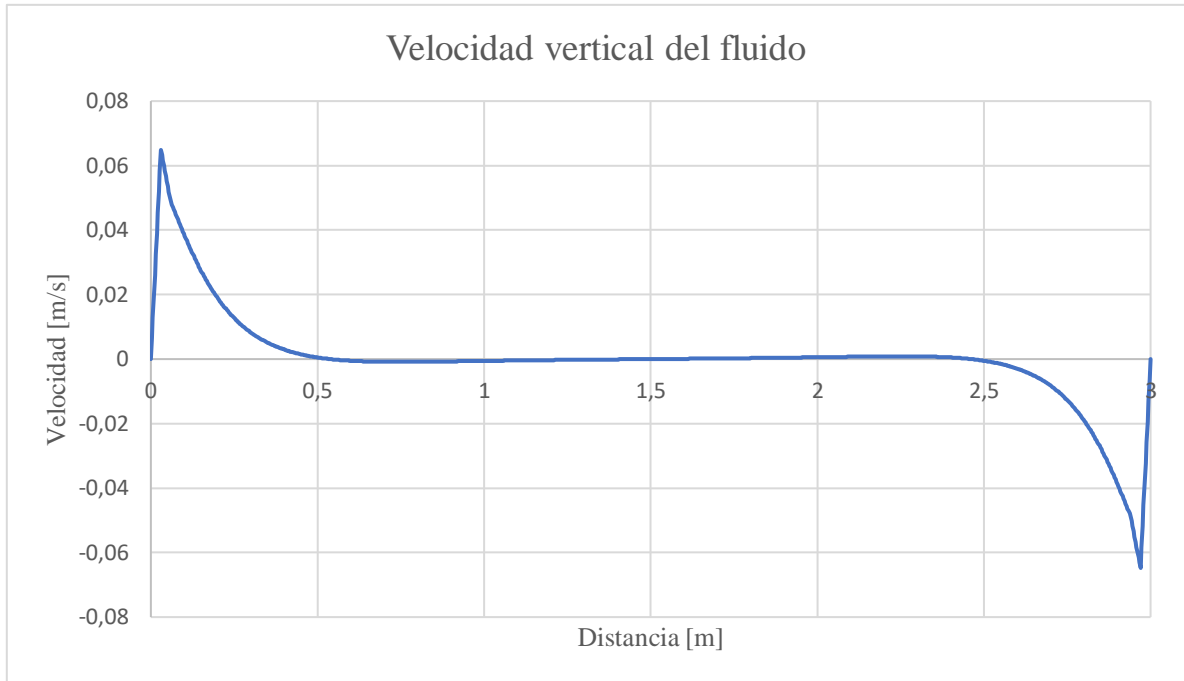


Figura 31. Gráfico de velocidad vertical del fluido para el modelo de relación de aspecto 5:1.

Del gráfico de la Figura 31 se logra apreciar la formación de un rollo convectivo con una longitud horizontal de 3 [m], la cual corresponde a la longitud total del recinto. Se alcanzan velocidades cercanas a los 0,06 [m/s] en los extremos.

#### 3.8.4.2 Resultados Modelo con relación de aspecto 10:1.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el caso de la simulación de convección natural en recinto cerrado con relación de aspecto de 10:1. En la Figura 32 se observa la formación de 2 rollos convectivos de similar tamaño.



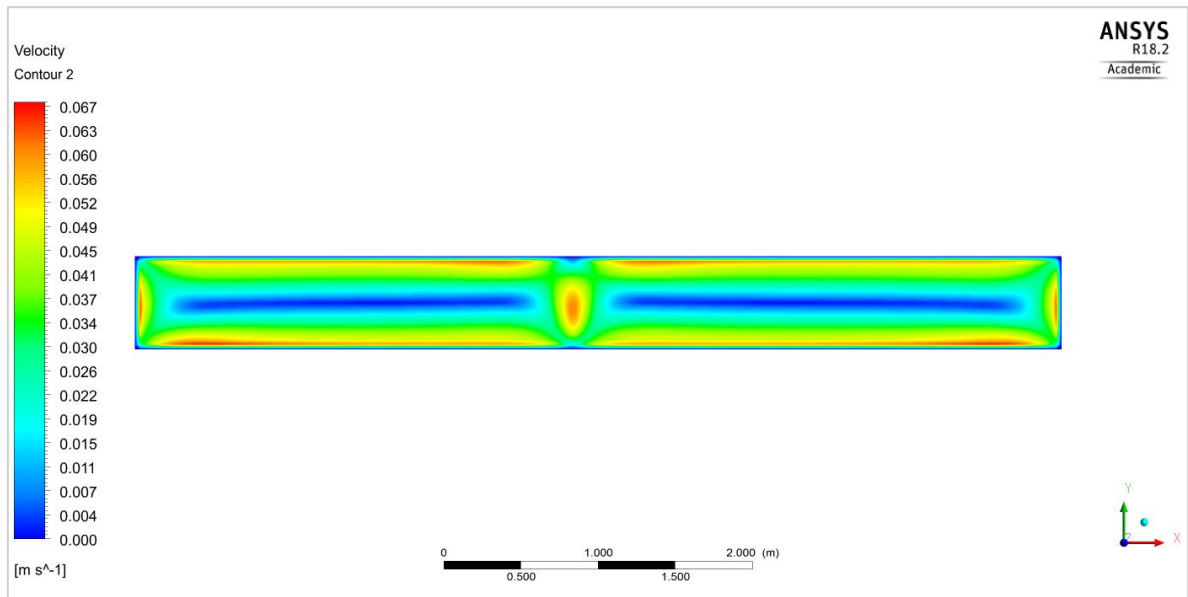


Figura 32. Campo de velocidades para modelo con relación de aspecto 10:1.

De la Figura 33, se observa que el sentido de giro de los rollos formados es el esperado, es decir, giran en sentidos opuestos, donde se observa el ascenso de fluido en la zona media y el descenso en los extremos.

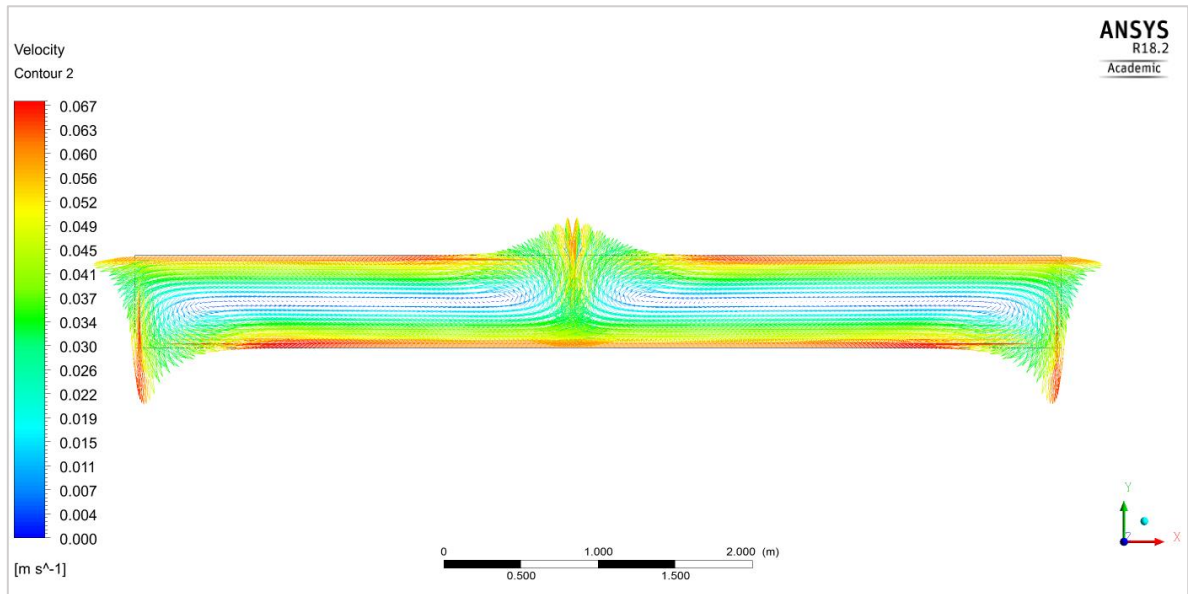


Figura 33. Campo vectorial de velocidades para modelo con relación de aspecto 10:1.

En la Figura 34 se muestra el campo de densidades para el caso de relación 10:1, donde se logra apreciar un comportamiento similar al mostrado en la Figura 28 para el caso de relación 5:1. La diferencia se observa en la simetría con respecto a la interfaz de los 2 rollos formados. Esto se debe al sentido opuesto de rotación de los rollos convectivos.

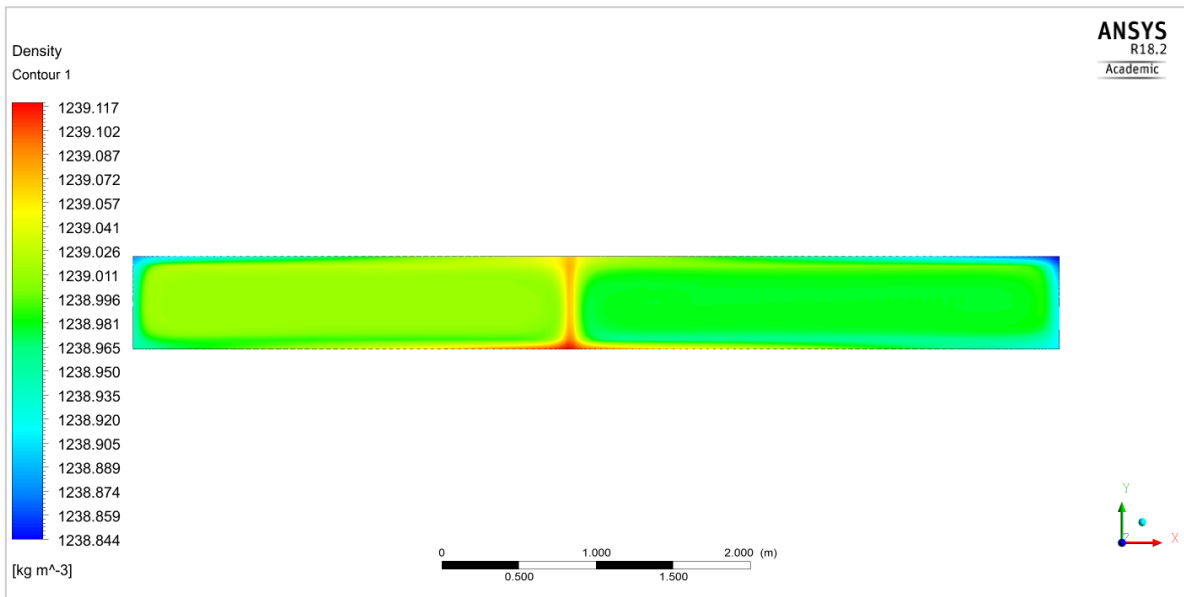


Figura 34. Campo de densidades para el modelo con relación de aspecto de 10:1.

En la Figura 35 se muestra el campo de temperaturas para el caso de relación 10:1, de este se logra apreciar que, a pesar de contar con la formación de 2 rollos convectivos, la temperatura en toda la zona interior del recinto es prácticamente homogénea. Con esto, se podría decir que independiente de la cantidad de rollos convectivos formados, la mezcla del fluido se logra de buena forma, logrando temperaturas similares en todo el interior.

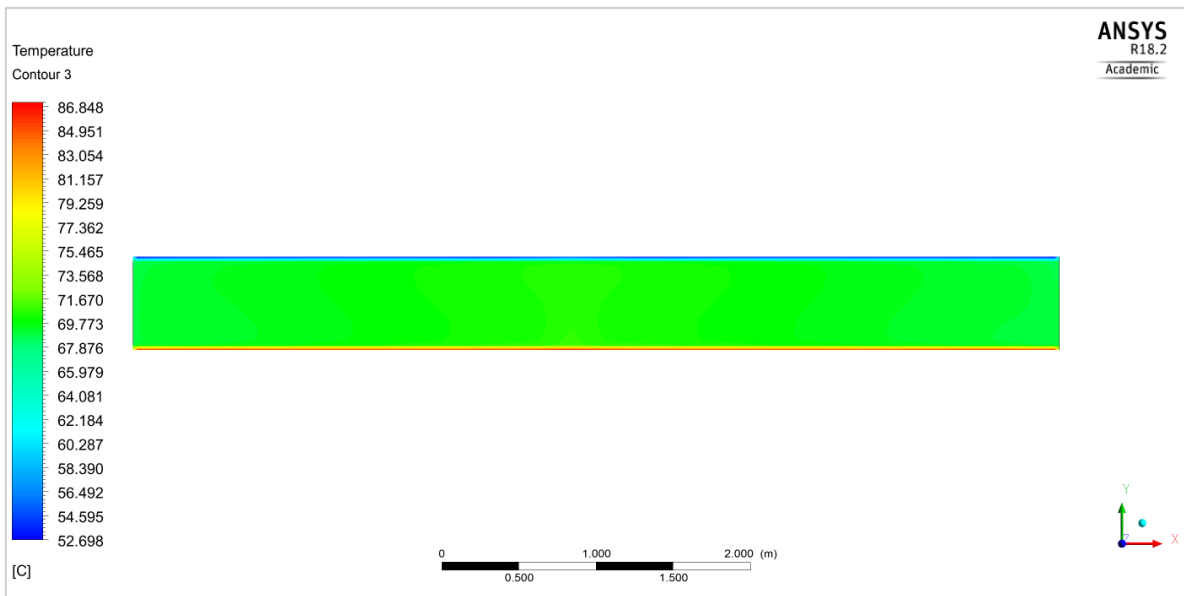


Figura 35. Campo de temperaturas para el modelo con relación de aspecto de 10:1.

En la Figura 36 se muestra el gráfico de velocidad vertical para el modelo de relación 10:1, donde se observa que las velocidades máximas alcanzan los 0,06 [m/s], de forma ascendente en el centro y de forma descendente en los extremos. Además, se observa que el tamaño de los rollos formados es bastante similar, siendo el mayor de ancho 3,2 [m] y el menor de ancho 2,8 [m], entregando un tamaño promedio de 3 [m].

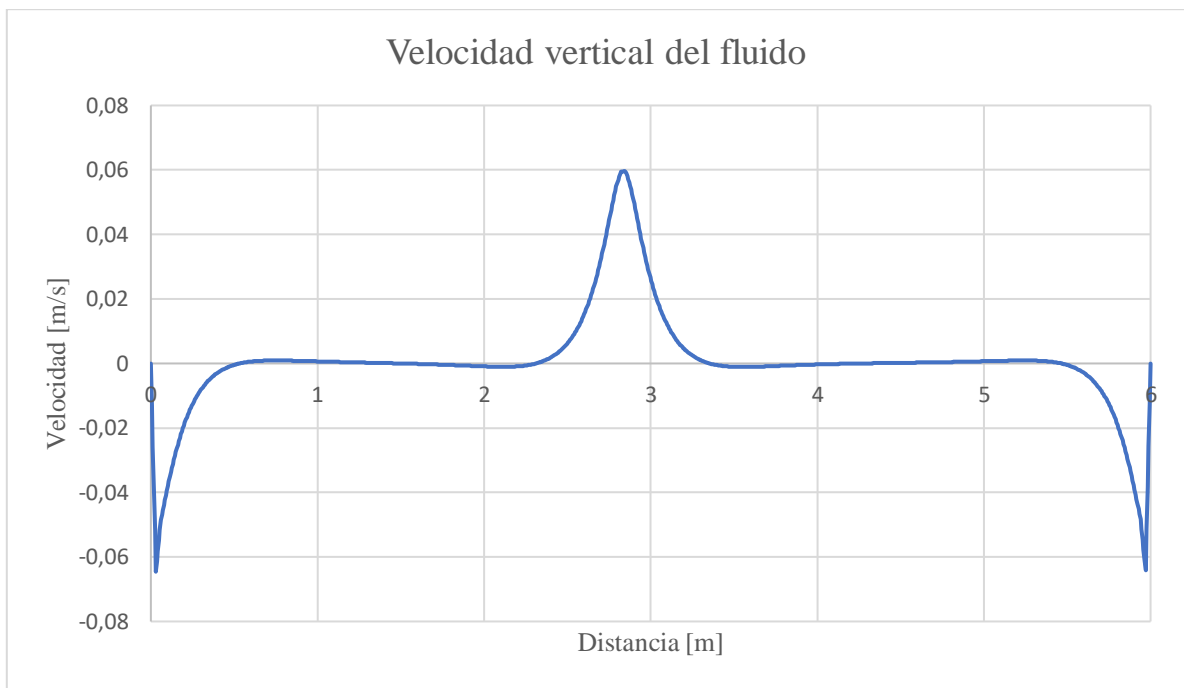


Figura 36. Gráfico de velocidad vertical del fluido para el modelo de relación de aspecto 10:1.

### 3.8.4.3 Resultados Modelo con relación de aspecto del tamaño original de la poza; 20:0,6.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el caso de la simulación de convección natural en recinto cerrado con relación de aspecto de 20:0,6, la cual corresponde a las dimensiones reales de la poza en Granada, España, utilizada como referencia para este estudio.

En la Figura 37 se muestra el campo de velocidades para el caso de relación 20:0,6, donde se observa la formación de 10 rollos convectivos.

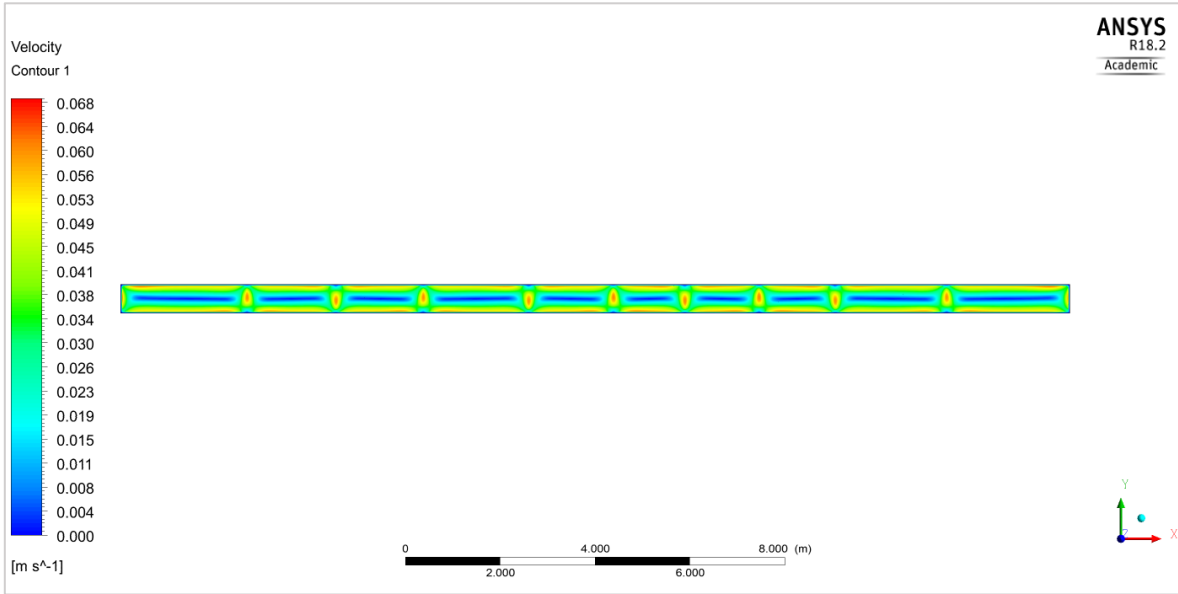


Figura 37. Campo de velocidades para modelo con relación de aspecto 20:0,6.

En la Figura 38 se muestra el campo vectorial de velocidades para el caso de relación 20:0,6. Se observa que se mantiene el sentido de rotación opuesto en 2 rollos contiguos, lo cual se condice con lo esperado para el estudio. Se observa que los valores máximos de velocidades se encuentran en los extremos de cada rollo. Por otro lado, se observa que las velocidades horizontales máximas se encuentran en la zona superior.

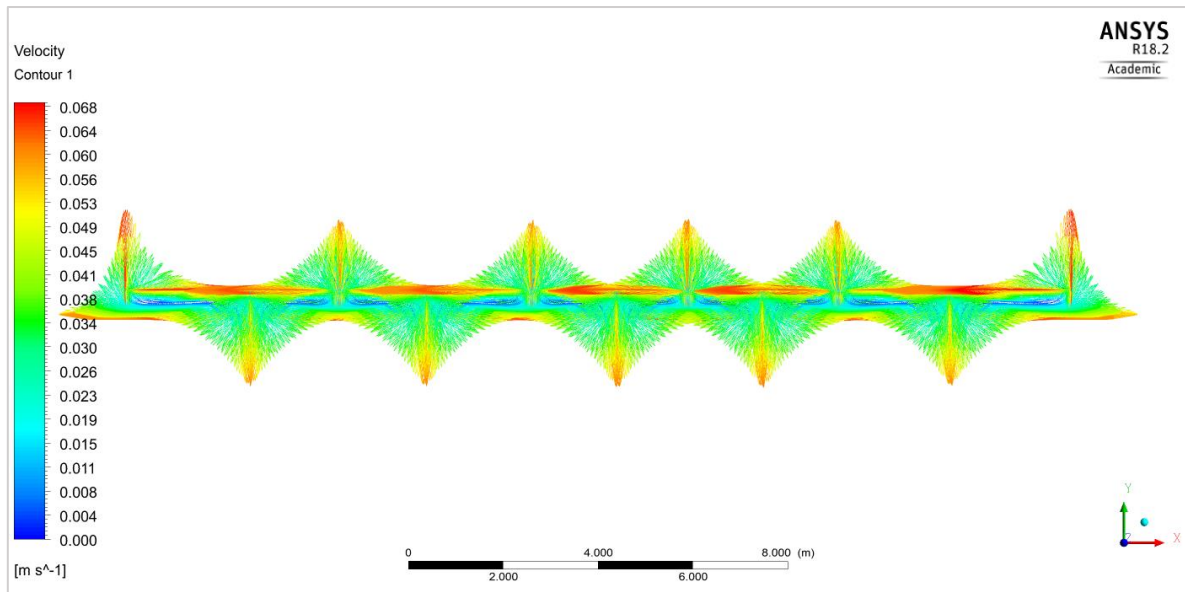


Figura 38. Campo vectorial de velocidades para modelo con relación de aspecto 20:0,6.

En la Figura 39 se muestra el campo de densidades para el caso de relación 20:0,6. Se observa que existen leves diferencias de densidad para los distintos, con cambios graduales, teniendo mayor densidad los rollos de la zona central y menor densidad los de las orillas. Puede que este efecto

disminuya al aumentar el tiempo de simulación utilizado, logrando densidades mucho más uniformes para cada uno de los rollos.

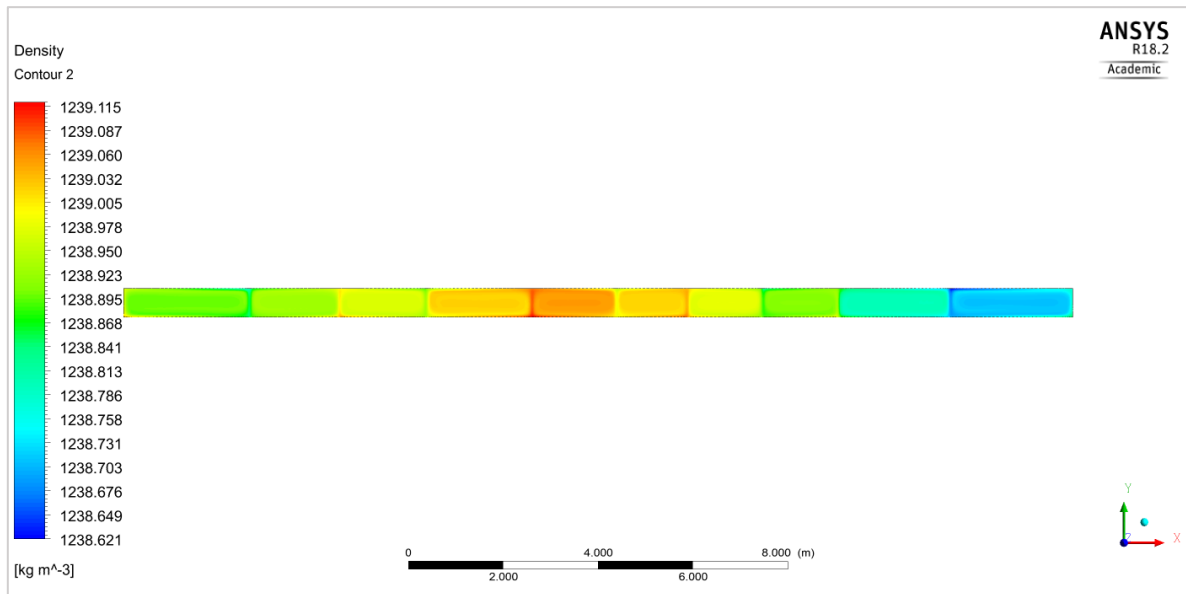


Figura 39. Campo de densidades para modelo con relación de aspecto 20:0,6.

En la Figura 40 se muestra el campo de temperaturas para el caso de relación 20:0,6. De este se logra apreciar que, a pesar de contar con la formación de 10 rollos convectivos, la temperatura en toda la zona interior del recinto es prácticamente homogénea, lo cual es similar a lo observado en los otros casos de estudio (Figura 29 y Figura 35).

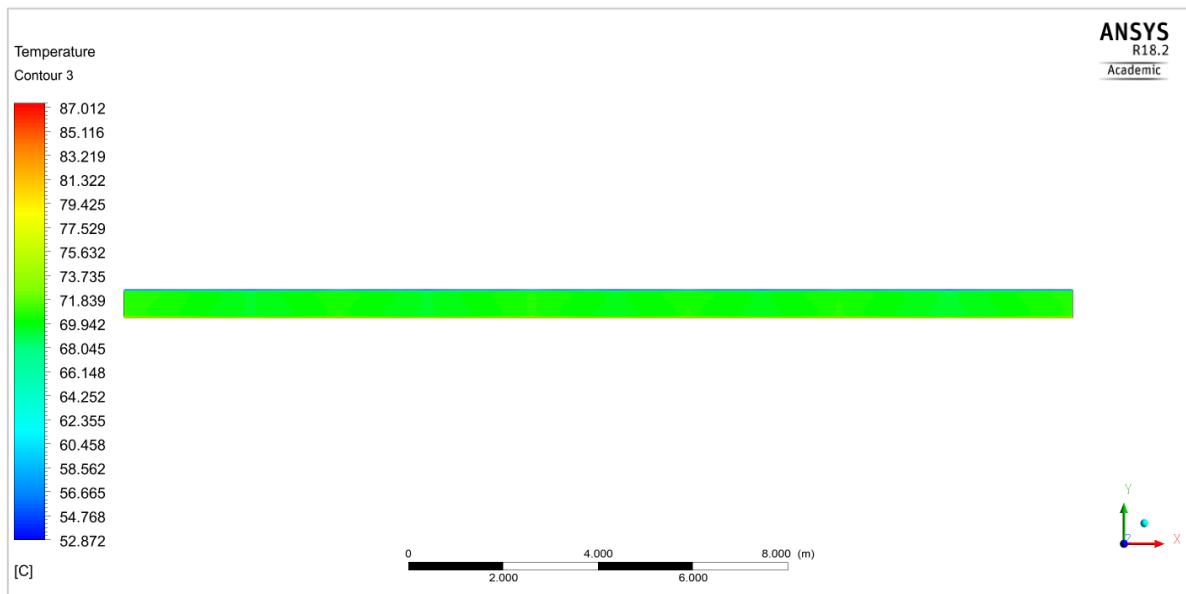


Figura 40. Campo de temperaturas para el modelo con relación de aspecto de 20:0,6.

En la Figura 41 se muestra el gráfico de velocidad vertical para el caso de relación 10:0,6. Se observa que las velocidades máximas alcanzadas rondan los 0,06 [m/s] en los extremos de cada rollo.

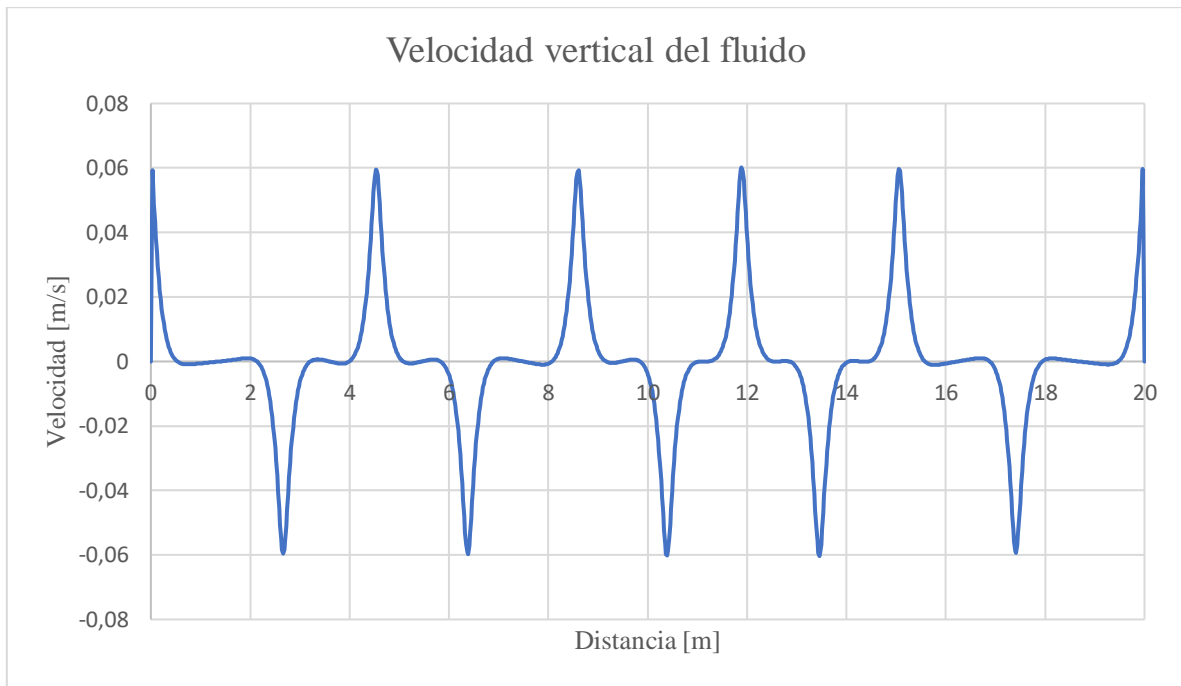


Figura 41. Gráfico de velocidad vertical del fluido para el modelo de relación de aspecto 20:0,6.

Del gráfico de la Figura 41, se observa la formación de 10 rollos convectivos. Se logra apreciar que los rollos en contacto con los bordes laterales alcanzan longitudes cercanas a los 3 [m] de ancho, mientras que los rollos del interior presentan longitudes cercanas a los 2 [m] o inferiores. Se alcanzan velocidades cercanas a los 0,06 [m/s] cercana a los extremos y en la interfaz de los rollos.

Teniendo en cuenta que estas dimensiones corresponden a la de la poza original de Granada, se esperaría que dicha poza formara una cantidad de rollos convectivos similar a la mostrada en este estudio. Se debe tener en cuenta que dicha poza se ve sometida a temperaturas menores (iniciando su operación con una temperatura de 45 °C), ya que en este estudio se analiza un caso con condiciones de funcionamiento particulares.

### 3.8.5 Comparación de resultados obtenidos

Dado que el tercer caso de estudio considera las dimensiones reales de la poza, ayuda a determinar el tamaño mínimo de la longitud horizontal de un rollo convectivo, que como se comentó anteriormente ronda los 2 a 3 [m]. Con esto, se puede realizar una comparación con los demás casos de estudio (relaciones de 5:1 y 10:1) para determinar cómo se comporta el tamaño de rollo convectivo para distintos largos del recinto de estudio.

A partir de la Figura 31, Figura 36, y Figura 41, se obtiene la cantidad y tamaño de rollos convectivos generados dentro de la geometría en estudio. A continuación, en la Tabla 8 se muestran los datos relevantes de las simulaciones:

Tabla 8. Comparación de cantidad y tamaño de rollos convectivos para los distintos modelos.

<b>Modelos</b>	<b>Cantidad de rollos convectivos</b>	<b>Tamaño medio de rollos convectivos</b>
Modelo 5:1	1	3 [m]
Modelo 10:1	2	3 [m]
Modelo 20:0,6	10	2 [m]

Para lograr determinar el tamaño ideal de la longitud horizontal de los rollos convectivos, se comparan los resultados obtenidos del caso de dimensiones reales con los otros 2 casos (relación de 5:1 y 10:1). Del caso asociado al tamaño real de la poza se observa que el tamaño promedio de los rollos convectivos formados es de 2 [m], mientras que para los casos de relaciones de 5:1 y 10:1 son de 3 [m]. Con esto, un posible motivo de la diferencia de tamaño se podría deber a que el tamaño óptimo del rollo convectivo se encuentra dentro del rango de 2 a 3 [m], por lo que existirían configuraciones que logren estabilidad para distintos tamaños de rollos en torno a estos valores.

De la Figura 41 se observa que los rollos que se encuentran cercano a los muros presentan un ancho mayor al resto, esto podría explicar el mayor tamaño de los rollos generados para los casos de relaciones de aspecto de 5:1 y 10:1 ya que, al ser de dimensiones tan ajustadas, todos sus rollos presentan contacto con los bordes laterales. Considerando esto, se fortalece el razonamiento de que el tamaño ideal de los rollos se encuentra entre los 2 a 3 [m].

La velocidad en los rollos es baja, alcanzando valores de hasta 0,06 [m/s] independiente de la cantidad de rollos y de la razón de aspecto de la zona. Los máximos de velocidad se encuentran en las fronteras horizontales y verticales del dominio. Esta velocidad, a pesar de ser baja, es suficiente para mezclar el fluido, lo que se manifiesta en que la temperatura se presenta uniforme, tanto en dirección horizontal como vertical, con variación solo en las fronteras horizontales del dominio. Esta uniformidad se observa en todos los casos, y hace que esta zona sea completamente diferente de la zona no convectiva, en que el gradiente de temperatura está distribuido en la dirección vertical.

Dadas estas características, el número de rollos no influye mayormente en la distribución de temperaturas en la zona, por lo cual, en base a esta evidencia, se puede afirmar que el fenómeno convectivo inferior no impone condiciones significativas para determinar el ancho de una poza solar experimental, ya que el mezclado se produce eficientemente para todos los casos independientemente del número de rollos. Se logra un correcto mezclado para una poza de ancho de 3 [m] como para la poza de ancho real de 20 [m], es por esto que se espera que para pozas más grandes el mezclado ocurra de buena forma independiente de la cantidad de rollos producidos.

Por último, cabe destacar que las simulaciones realizadas para los casos de convección natural son para tiempos cortos (6 [h]) con respecto a los tiempos de funcionamiento de una poza solar (meses, años), lo que no garantiza que el nivel de velocidades se mantenga. En el caso de que las velocidades crezcan, el mezclado en la zona será siempre suficiente para mantener la uniformidad de la temperatura que se observa.

## 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se realiza un estudio de los fenómenos físicos en que más influye la dimensión horizontal de una poza solar, los cuales corresponde a: evaporación superficial, conducción hacia paredes laterales y convección natural en las zonas convectivas. Con este estudio se determina la magnitud de la dimensión horizontal mínima necesaria para que los bordes laterales no sean influyentes en los parámetros de desempeño presentes en la poza. El estudio se realiza de manera desacoplada dado que la consideración de estos efectos en conjunto presenta una alta exigencia y aún no existen estudios en el mundo que realicen algo similar a dicho acople. La Poza solar de Granada es un ejemplo de la aplicabilidad de las pozas de colección de energía en condiciones de radiación solar inferiores a las del norte chileno. Esto sugiere una futura posibilidad de aplicación en Chile para suministrar calor de procesos, a temperatura moderada, como alternativa a los colectores solares planos.

Del análisis del fenómeno de evaporación que ocurre en la superficie de la poza, se logra apreciar una disminución de la evaporación a medida que se avanza hacia el interior de la poza. Pero, esta disminución no logra estabilizarse para longitudes correspondientes a las de una poza solar, las cuales pueden rondar en el orden de 20 a 30 [m] de longitud. De todas formas, se obtiene que para pozas a partir de 17,7 [m] de longitud, su tasa de evaporación promedio presenta diferencias bastante bajas con respecto a la de una poza de tamaño real (diferencias inferiores al 10%).

El estudio de la influencia de la conducción horizontal de la Zona No Convectiva permite determinar la longitud asociada al gradiente térmico horizontal en las paredes laterales. Donde se obtiene que se necesita una longitud cercana a los 15 [m], para asegurar que en la zona interior no exista una influencia considerable de la temperatura por pérdidas laterales. Si bien el espesor de capa conductiva es bastante grande (7,65 [m]), se debe tener en cuenta que se considera un caso con una de las mayores temperaturas de trabajo de una poza solar, la cual corresponde a 90 °C, por lo que casos que utilicen temperaturas menores deberían presentar menores largos de capa límite térmica. Además, la diferencia de temperatura presentes entre las paredes y la zona interior es de 5 °C, lo que es bastante bajo si se considera la cantidad de energía que se puede extraer para esas distintas temperaturas, por lo que considerar dimensiones horizontales menores no presentarían grandes pérdidas de calor que hagan inviable la construcción y correcto desempeño de la poza solar.

Del estudio asociado a la formación de rollos convectivos en la Zona Convectiva Inferior, se logra determinar el rango de la longitud característica de los rollos, estableciendo que su largo característico se encuentra ente los 2 a 3 [m]. Para la geometría que considera las dimensiones reales de la zona, se observa que los rollos presentan similitud y un patrón de tamaño prácticamente constante, lo que ayuda a fundamentar lo mencionado anteriormente de la longitud característica. Si bien, se logra determinar el comportamiento de los rollos convectivos, la cantidad de éstos no influye en la mezcla de esta zona a modo de obtener una temperatura uniforme en todo el espacio, ya que esta uniformidad se logra para todas las geometrías analizadas.



Del análisis de los diferentes fenómenos se ha buscado inferir criterios de escala para recomendar dimensiones mínimas de una poza solar experimental ubicada en el norte de Chile. Según el criterio de evaporación superficial en la Zona Convectiva Superior, se obtiene una longitud mínima de 17,7 [m] a partir de los cuales comienza a ser relativamente independiente la tasa evaporativa media de la longitud horizontal. Según el criterio de conducción lateral en la Zona No Convectiva, considerando que los gradientes térmicos abarcan una longitud total de 15,3 [m], se considera esta distancia como una cota mínima a partir de la cual adicionar longitud horizontal para lograr zonas con mayor uniformidad. Finalmente, según el criterio de convección natural en la Zona Convectiva Inferior, se obtiene que independiente de la cantidad de rollos convectivos generados, se logra una buena mezcla de la temperatura en el interior de la zona, por lo que en este ámbito quedarían los otros 2 efectos como determinantes. Sin embargo, considerando que el tamaño de rollo convectivo ronda los 2 a 3 [m], se podría establecer una cantidad mínima de rollos convectivos, y con esto, obtener una longitud característica asociada a este fenómeno.

A partir de los criterios mencionados, se puede considerar que, dado que el almacenamiento de energía es la función de mayor importancia de la poza y esta se realiza principalmente en la Zona Convectiva Inferior, deberían aquellos asociados a dicha zona los que determinen las dimensiones. En segundo lugar, se ubicarían los criterios asociados al aseguramiento de un perfil lineal de temperatura y concentración salina en la Zona No Convectiva, ya que de la mantención de estos gradientes depende la estabilidad de la poza, la cual se manifiesta en una distribución uniforme de temperatura para una misma altura. Finalmente, se consideran aquellos criterios relacionados con el resto de las zonas y condiciones de funcionamiento de la poza, donde se encuentra la evaporación superficial en la Zona Convectiva Superior.

Es importante señalar que los criterios corresponden a cotas mínimas asociadas a la longitud, por lo que serán los anchos más grandes los que determinarán el largo de la poza. Teniendo en cuenta esto, y considerando los estudios realizados a lo largo de este trabajo, se concluye que el ancho mínimo de una poza solar experimental debe ser de al menos 17,7 [m], lo que aseguraría diferencias mínimas en el desempeño de la poza para los fenómenos estudiados.

Se deja propuesto realizar el estudio y análisis de los rollos convectivos generados en la Zona Convectiva Superior, considerando el factor adicional de la velocidad de corte que produce el viento en la interfaz aire-agua, donde dicho movimiento del fluido podría generar cambios en el ancho característico de los rollos convectivos.

Para lograr una respuesta mucho más completa y acabada de la dimensión característica de la poza sometida a estos diversos fenómenos, se debería elaborar un modelo que acople los fenómenos mencionados anteriormente. Con esto, se lograría determinar cómo interactúan los fenómenos entre sí, lo que ayudaría a completar este estudio.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ruskowitz, J. A., Suárez, F., Tyler, S. W. & Childress, A. E. (2014). Evaporation suppression and solar energy collection in a salt-gradient solar pond. *Solar Energy*, 99, 36-46.
- [2] Velmurugan, V. & Srithar, K. (2008). Prospects and scopes of solar pond: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2253-2263.
- [3] Leblanc, J., Akbarzadeh, A., Andrews, J., Lu, H. & Golding, P. (2011). Heat extraction methods from salinity-gradient solar ponds and introduction of a novel system of heat extraction for improved efficiency. *Solar Energy*, 85, 3103-3142.
- [4] Kurt, H., Ozkaymak, M. & Binark, A. K. (2006). Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt gradient solar-pond performance under simulated solar-radiation. *Applied Energy*, 83, 324-342.
- [5] Suárez, F., Tyler, S. W. & Childress, A. E. (2010). A fully coupled, transient double-diffusive convective model for salt-gradient solar ponds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 1718-1730.
- [6] R. L. Frederick & C. Riobó (2016). Heat exchangers for solar pond applications. 14th International Conference on Simulation and Experiments in Heat Transfer and its Applications.
- [7] Ridha Ben Mansour, Cong Tam Nguyen, Nicolas Galanis (2006). Transient heat and mass transfer and long-term stability of a salt-gradient solar pond. *Mechanics Research Communications* 33 (2006) 233–249.
- [8] V. Velmurugan, K. Srithar (2008). Prospects and scopes of solar pond: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 2253–2263.
- [9] A. Alcaraz, M. Montalà, J.L. Cortina, A. Akbarzadeh, C. Aladjem, A. Farran, C. Valderrama (2018). Design, construction, and operation of the first industrial salinity-gradient solar pond in Europe: An efficiency analysis perspective. *Solar Energy* 164 (2018) 316-326.
- [10] C. Riobó (2015). Recuperación de energía desde pozas solares para suministrar calor a procesos mineros. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [11] Francois Risacher, Hugo Alonso, Carlos Salazar (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews* 63 (2003) 249–293.
- [12] Explorador solar. Ministerio de energía [en línea]  
<<http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>>
- [13] Agromet: Red Agroclimática Nacional [en línea] <<http://agromet.inia.cl/estaciones.php>>

- [14] Luisandra García (2014). Evaporación del agua en superficies libres [en línea] <[https://issuu.com/luisandragarcia/docs/evaporacion\\_desde\\_superficies\\_libres](https://issuu.com/luisandragarcia/docs/evaporacion_desde_superficies_libres)>
- [15] Mapa Minero de Chile [en línea] <<http://www.sonami.cl/site/mapaminero>>
- [16] Jeffrey A. Ruskowitz, Francisco Suárez, Scott W. Tyler, Amy E. Childress (2013). Evaporation suppression and solar energy collection in a salt-gradient solar pond. *Solar Energy* 99 (2014) 36-46.