



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

MODELAMIENTO DE LA TASA DE EVAPORACIÓN DE UNA POZA SOLAR

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

MARÍA JESÚS RUBIO ESPINOZA

PROFESOR GUÍA:
RAMÓN FREDERICK GONZALEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2012

RESUMEN EJECUTIVO

En la presente memoria se analizan las pozas solares, que corresponden a cuerpos de agua y sal disuelta que en su sector más profundo presentan temperaturas que pueden llegar a los 90(°C), mientras que la superficie se encuentra a temperatura ambiente. Dada esta diferencia de temperaturas este sistema es digno de estudio por su gran potencial como fuente de energía renovable. El parámetro a estudiar es su tasa de evaporación, porque da cuenta de uno de los cuidados de mantenimiento que se debe tener en este tipo de sistemas. El estudio se realiza mediante un modelo de volúmenes finitos en el software multifásico ANSYS FLUENT.

Este informe se divide en el estudio de tres modelos.

Primero se realiza un modelo monofásico isoterma en que se supone la superficie de la poza como una superficie sólida con humedad relativa igual a 100%, donde sólo existe transferencia de masa. Se estudia los efectos de la variación de la humedad relativa, la velocidad del aire y el tamaño de la poza sobre la tasa de evaporación. Cada resultado computacional de la tasa de evaporación es validado con un cálculo en base a un modelo que utiliza la analogía entre transferencia de calor y transferencia de masa.

En segundo lugar se realiza un modelo bifásico sin gradiente salino, que se encuentra compuesto por el cuerpo de agua y la atmósfera, con diferentes temperaturas entre el aire y el agua, sin fuente de calor radiativa. Se analizan el caso de convección natural y el caso de convección forzada con flujo laminar a 1(m/s).

Se realiza un modelo bifásico de aire y salmuera, donde el sistema se inicializa con un gradiente salino determinado y existe una fuente de calor radiativa desde el fondo de la misma. Se analiza el caso de convección forzada a 0,15 m/s en el aire.

Finalmente se realiza un análisis comparativo de la tasa de evaporación entre los tres modelos para las mismas condiciones físicas del sistema. Las tasas de evaporación en sistemas salinos resultan menores que las de agua pura, las que a su vez son menores que las obtenidas con la analogía entre transferencia de calor y masa.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia: a Héctor Rubio por ser mi consejero cada vez que necesité un guía, a José Rubio por ser un apoyo incondicional y, con especial cariño, a Enriqueta Espinoza por ser mi pilar en los momentos más difíciles ya que sin su fe en mi jamás hubiera emprendido esta aventura y nunca me hubiera encontrado escribiendo estas palabras.

También dedico esta memoria a todos mis amigos y compañeros con quienes he compartido este largo proceso, principalmente a Alexis Acuña que ha estado a mi lado durante estos años de universidad y que ha sido mi mejor amigo y compañero incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores las enseñanzas impartidas a lo largo de todos los años de estudio, ya que gracias a ellas he podido realizar este trabajo.

Principalmente agradezco a mi profesor guía Ramón Frederick su preocupación, ayuda y consejos que han trascendido más allá de lo netamente académico.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	3
ÍNDICE DE NOMENCLATURA	5
1 INTRODUCCIÓN	7
1.1. OBJETIVOS	7
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	7
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.2. ALCANCES	9
2 ANTECEDENTES GENERALES	10
2.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO CUALITATIVO DE UNA POZA SOLAR	10
2.2. MARCO TEÓRICO PARA POZA SOLAR SIN GRADIENTE SALINO.	13
2.2.1. CASO SIMPLIFICADO A PLACA PLANA	13
2.2.2. FORMULACIÓN EMPÍRICA PARA EL CÁLCULO DE LA TASA DE EVAPORACIÓN, CASO SIMPLIFICADO PLACA PLANA.	15
2.2.3. CASO DE EVAPORACIÓN EN UNA POZA SIN GRADIENTE SALINO, BAJO CONVECCIÓN NATURAL.	18
2.2.4. CASO DE EVAPORACIÓN EN UNA POZA SIN GRADIENTE SALINO, BAJO CONVECCIÓN FORZADA.	21
2.3. MARCO TEÓRICO PARA EL CASO DE UNA POZA SOLAR, CON GRADIENTE SALINO.	23
2.4. FÓRMULA PARA CÁLCULO DE DIFERENCIA PORCENTUAL.	30
2.5. ECUACIONES UTILIZADAS PARA EL MODELO COMPUTACIONAL.	30
2.5.1. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MASA.	31
2.5.2. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MOMENTO.	32
2.5.3. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.	32
2.6. ALGORITMOS DE ANSYS PARA RESOLVER PROBLEMAS EN ESTADO ESTACIONARIO Y TRANSIENTE.	33
3 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL PARA DETERMINAR LA TASA DE EVAPORACIÓN PARA UN MODELO MONOFÁSICO.	35
3.1. DATOS INICIALES DE LA SIMULACIÓN.	35
3.2. ESTUDIO DEL MODELO.	36
3.3. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA TASA DE EVAPORACIÓN PARA UN MODELO MONOFÁSICO.	42
4 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR PARA UN MODELO BIFÁSICO.	51
4.1. GEOMETRÍA.	51
4.2. MALLADO Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA	52
4.3. MODELADO	53
4.3.2. SOLUCIÓN CUALITATIVA.	53
5 MODELO DE EVAPORACIÓN SIN GRADIENTE SALINO, CON CONVECCIÓN NATURAL.	55
5.1. FÍSICA DEL PROBLEMA.	55
5.2. CÁLCULO EMPÍRICO DE LA EVAPORACIÓN DE UNA POZA CON CONVECCIÓN NATURAL.	55
5.3. GEOMETRÍA	56
5.4. MALLADO Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA.	57
5.5. RESULTADOS	58

6	MODELO DE EVAPORACIÓN BIFÁSICO SIN GRADIENTE SALINO CON CONVECCIÓN FORZADA, VELOCIDAD 1 <i>MS</i> .	62
6.1.	FÍSICA DEL PROBLEMA	62
6.2.	GEOMETRÍA	62
6.3.	MALLADO Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA	63
6.4.	RESULTADOS.	63
6.5.	AJUSTE DE GEOMETRÍA DEL MODELO.	69
7	MODELO DE TASA DE EVAPORACIÓN BIFÁSICO CON GRADIENTE SALINO CON CONVECCIÓN FORZADA, VELOCIDAD DEL AIRE ES 0,15 <i>MS</i> .	74
7.1.	FÍSICA DEL PROBLEMA	74
7.2.	GEOMETRÍA	75
7.3.	MALLADO, INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA.	75
7.4.	RESULTADOS.	79
8	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.	83
8.1.	CONCLUSIONES	83
8.1.1.	MODELOS RESUELTOS	83
8.1.2.	RESULTADOS DE LOS MODELOS	85
8.1.3.	COMPARACIÓN ENTRE LOS TRES MODELOS	87
8.2.	COMENTARIOS	88
	BIBLIOGRAFÍA	89
A.	ANEXO: CARTA PSICROMÉTRICA.	91
B.	ANEXO: TABLA DE TENSIÓN SUPERFICIAL VERSUS TEMPERATURA.	92
C.	ANEXO: CÁLCULO DENSIDAD DEL AIRE HÚMEDO.	93
D.	ANEXO: ALGORITMOS DE AVANCE DE TIEMPO.	95
E.	ANEXO: MODELO DE EVAPORACIÓN-CONDENSACIÓN.	98
F.	ANEXO: PROPIEDADES DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE SODIO.	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 2.1: ESTRATIFICACIÓN Y BALANCE TÉRMICO DE UNA POZA SOLAR	11
FIGURA 2.2: CURVA DE SALINIDAD (%), TEMPERATURA (°C) Y DENSIDAD (KG/M ³) VERSUS PROFUNDIDAD DE LA POZA SOLAR.	12
FIGURA 2.3: ESQUEMA FLUJO DE AIRE SOBRE UNA PLACA PLANA.	13
FIGURA 2.4: ESQUEMA DE POZA.	15
FIGURA 2.5: ESQUEMA DE UN TANQUE PARA CÁLCULO DE LA TASA DE EVAPORACIÓN EN FORMA EMPÍRICA. A) CÁMARA INFRARROJA PARA MEDIR LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE, B) SENSOR DE TEMPERATURA DEL CUERPO DE AGUA; C) SENSOR HUMEDAD RELATIVA; D) SENSOR TEMPERATURA DEL AIRE; E) TUBO SIFÓN AGUA; F) BALANZA ELÉCTRICA PARA MEDIDAS DE EVAPORACIÓN. FUENTE: S. M. SOWER [5].	18
FIGURA 2.6: ESQUEMA DEL PROCESO DE TRANSPORTE EN EL AIRE Y AGUA PARA UN TANQUE DE AGUA. FUENTE: S. M. BOWER [5].	20
FIGURA 2.7: ESQUEMA DE MOVIMIENTO DEL CUERPO DE AGUA Y DEL AIRE PARA EL CASO DE CONVECCIÓN FORZADA.	21
FIGURA 2.8: RENDIMIENTO PROMEDIO ANUAL EN ESTADO ESTACIONARIO PARA UNA POZA CLARA. DIFERENTES VALORES DE: ESPESOR DE CAPA NO CONVECTIVA, ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL Y CARGA PROMEDIO. FUENTE: F. ZANGRADO [8]	24
FIGURA 2.9: PARÁMETRO DE ESTABILIDAD EN LA POZA EN FUNCIÓN DE LAS ESTACIONES DEL AÑO: A) INVIERNO, B) PRIMAVERA, C) VERANO, D) OTOÑO. FUENTE: RIDHA BEN MANSOUR [9].	27
FIGURA 2.10: EFECTO DE LA TRANSPARENCIA DEL AGUA EN: A) CURVAS DE TEMPERATURA; B) CURVA DE PARÁMETRO DE ESTABILIDAD, AMBOS EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA POZA. FUENTE: RIDHA BEN MANSOUR [9].	28
FIGURA 2.11: SALINIDAD A TRAVÉS DEL TIEMPO. FUENTE: RIDHA BEN MANSOUR [9].	29
FIGURA 3.1: MALLADO DEL VOLUMEN DE CONTROL A MODELAR, CON 2m DE LARGO POR 0,7m DE ALTO.	39
FIGURA 3.2: FLUJO LAMINAR, CON VELOCIDAD DEL VIENTO DE 3(M/S). A) CAPA LÍMITE DE VELOCIDAD; B) FRACCIÓN MÁSCICA DE AGUA.	46
FIGURA 3.3: FLUJO TURBULENTO, CON VELOCIDAD DEL VIENTO DE 5 (M/S). A) CAPA LÍMITE DE VELOCIDAD; B) FRACCIÓN MÁSCICA DE AGUA; C) ENERGÍA CINÉTICA DE TURBULENCIA.	46
FIGURA 4.1: GEOMETRÍA DEL MODELO 2D.	52
FIGURA 4.2: SUCESIÓN DE CONTORNO DE TEMPERATURA (K), 132 (s), 360 (s), 980 (s)	54
FIGURA 4.3: SUCESIÓN DE LÍNEAS DE CORRIENTE DE VELOCIDAD (M/S), 132 (s), 360 (s), 980 (s).	54
FIGURA 5.1: SISTEMA AGUA PURA - ATMÓSFERA, ESTUDIO TRANSFERENCIA DE MASA BAJO CONVECCIÓN NATURAL.	56
FIGURA 5.2: A) CURVAS DE VELOCIDAD DEL AIRE; B) VECTORES DE VELOCIDAD DEL AIRE.	58
FIGURA 5.3: A) CURVAS DE VELOCIDAD DEL AGUA; B) VECTORES DE VELOCIDAD DEL AGUA.	59
FIGURA 5.4: A) CONTORNO DE TEMPERATURA DEL AIRE; B) CONTORNO DE FRACCIÓN MÁSCICA DEL VAPOR DE AGUA EN EL AIRE.	59
FIGURA 5.5: CONTORNO DE TEMPERATURA DEL AGUA DE LA POZA	60
FIGURA 5.6: PARA UN TIEMPO REAL DE 34 s, SE MUESTRAN LAS SIGUIENTES FIGURAS: A) CURVA DE VELOCIDAD DEL AIRE; B) CURVAS DE VELOCIDAD DEL AGUA; C) CONTORNO DE TEMPERATURA DEL AIRE; D) CONTORNO DE FRACCIÓN MÁSCICA DEL VAPOR DE AGUA EN EL AIRE.	61
FIGURA 6.1: DIMENSIONES MODELO SISTEMA BIFÁSICO CON EVAPORACIÓN BAJO CONVECCIÓN FORZADA.	62
FIGURA 6.2: A) CONTORNO DE DENSIDAD GLOBAL DEL SISTEMA; B) CURVAS DE VELOCIDAD DEL AIRE.	63
FIGURA 6.3: A) CURVAS DE VELOCIDAD DEL AGUA; B) VECTORES DE VELOCIDAD DEL AGUA.	64
FIGURA 6.4. A) Y B) CONTORNOS DE VELOCIDAD DEL AGUA	65

FIGURA 6.5: A) CONTORNO DE VELOCIDAD DEL AIRE; B) CONTORNO DE FRACCIÓN MÁSCICA DE VAPOR EN EL AIRE HÚMEDO.	66
FIGURA 6.6: CONTORNO DE TEMPERATURA EN EL AGUA, AMPLIFICADO 3 VECES EN EL "EJE Y" (VERTICAL).	67
FIGURA 6.7: PARA UN TIEMPO REAL DE 93 (S), SE MUESTRAN LOS SIGUIENTES CONTORNOS DE TEMPERATURA AMBOS AMPLIFICADOS 5 VECES EN EL "EJE Y" (VERTICAL): A) CONTORNO DE TEMPERATURA EN LA ATMÓSFERA;	B)
CONTORNO DE TEMPERATURA EN LA POZA	68
FIGURA 6.8: PARA UN TIEMPO REAL DE 93 S, SE MUESTRAN LAS SIGUIENTES LÍNEAS DE VELOCIDAD: A) LÍNEAS DE VELOCIDAD DEL AIRE; B) LÍNEAS DE VELOCIDAD DEL AGUA.	68
FIGURA 6.9: CONTORNO DE VELOCIDAD DEL AIRE AMPLIFICADO EN 5 VECES EN EL "EJE Y".	69
FIGURA 6.10: LÍNEAS DE VELOCIDAD DEL AGUA EN LA POZA: A) 390 (S) B) 2251 (S).	72
FIGURA 7.1: DIMENSIONES MODELO SISTEMA BIFÁSICO CON EVAPORACIÓN BAJO CONVECCIÓN FORZADA.	75
FIGURA 7.2: INICIALIZACIÓN DE GRADIENTE SALINO <i>KgNaClKgSalmuera</i>	76
FIGURA 7.3: INICIALIZACIÓN DE DENSIDAD DE LA MEZCLA <i>Kgm3</i>	77
FIGURA 7.4:A) CONTORNO DE VELOCIDAD DE LA SALMUERA; B) LÍNEAS DE VELOCIDAD DE LA SALMUERA.	79
FIGURA 7.5: A) CONTORNO DE LA TEMPERATURA EN LA SALMUERA; B) LÍNEAS DE VELOCIDAD DEL AIRE.	80
FIGURA 7.6: CONTORNO DE FRACCIÓN MÁSCICA DE CLORURO DE SODIO EN LA POZA SOLAR.	80

ÍNDICE DE NOMENCLATURA

a : Ancho de la Poza (m)

D_{AB} : Difusividad de especie A en especie B (m^2/s)

e : Diferencia porcentual de Tasa de Evaporación (%)

g : Aceleración de gravedad (m/s^2)

$h_{m,L}$: Coeficiente de transferencia de Calor por Convección (m/s)

L : Largo de la Poza (m)

n_A : Tasa Evaporativa (Kg/s)

p : Presión (Pa)

S : Salinidad del agua ($Kg_{NaCl}/Kg_{salmuera}$)

S_m : Fuente de masa

S_M : Fuente de momento

S_i : Fuente de energía

T_w : Temperatura del agua ($^{\circ}C$)

T_{∞} : Temperatura del aire ($^{\circ}C$)

t : Tiempo (s)

u_{∞} : Velocidad del viento (m/s)

u, v, ω : Velocidad del flujo en la dirección x, y, z (m/s)

\mathbf{u} : Tensor de velocidad (m/s).

α : Expansión térmica evaluada en un punto de referencia

β : Contracción salina evaluada en un punto de referencia

ζ : Coeficiente de expansión volumétrica ($1/K$)

ϑ : Difusividad térmica del agua (m^2/s)

ε : Distancia de Borde de la Poza (m)

ν : Viscosidad Cinemática (Pas)

ν : Viscosidad Dinámica (m^2/s)

ρ_A : Densidad del Aire (Kg/m^3)

ρ_w : Densidad del Agua (Kg/m^3)

ν_{AIRE} : Volumen Específico (m^3/Kg)

ϕ_∞ : Humedad Relativa del Aire (%)

Φ : Función de disipación de energía por causa de efectos viscosos

Ra : Número de Rayleigh

Re : Número de Reynolds

Sc : Número de Schmidt

Sh : Número de Sherwood

1 INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde a un estudio realizado para la obtención del Título de Ingeniera Civil Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Las Pozas Solares son sistemas hídricos que colectan y almacenan energía solar. Inicialmente fueron descubiertas en Hungría como un fenómeno natural, en que a una profundidad de 1,32 (m) el líquido alcanzaba una temperatura de 70(°C) aprox. durante la temporada de verano. Estos lagos presentan sales en la composición del líquido, por lo que se denominan "Pozas Solares de Gradiente Salino". Son sistemas que se encuentran abiertos al medio ambiente, por lo tanto, los cambios climáticos que se presenten a su alrededor tendrán influencia sobre la estabilidad de este sistema, dependiendo de su funcionamiento y mantención de múltiples variables.

Algunas aplicaciones de este sistema son: calefacción de casas, edificios, piscinas, invernaderos, calefacción de procesos industriales, desalinización, generación de energía eléctrica, entre otras.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

La capacidad para predecir la tasa de evaporación de los cuerpos de agua es un tema de gran importancia para el manejo de los recursos hídricos en ámbitos como la agricultura, industrias, necesidades humanas de higiene, entretención, entre otras.

El objetivo del presente trabajo es predecir a través de un modelo computacional, realizado en ANSYS FLUENT, la tasa de evaporación de un sistema de poza solar, teniendo en cuenta variables como: velocidad del aire, temperatura del aire y la salmuera, humedad relativa del aire y tamaño de la poza.

Dado que es un sistema abierto, el líquido en la Poza Solar tenderá a evaporar en mayor o menor medida dependiendo de las condiciones climáticas. Ésta evaporación influenciará en la eficiencia de la poza, y por lo tanto sobre su mantención.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir del objetivo general se desprenden acciones que se consideran objetivos específicos del informe.

Se estudian diferentes formulaciones teóricas para determinar la tasa evaporativa de un sistema formado por aire húmedo y agua. Se analizan dos teorías que corresponden a: la analogía entre transferencia de calor y transferencia de masa, y a las teorías empíricas basadas en la medición de tasa de evaporación dependiendo de las diferencias de presión entre la superficie de la poza y la atmósfera.

Durante el análisis del sistema de poza solar, se realiza un estudio progresivo del problema, agregando en cada nuevo modelo una mayor complejidad del sistema. Este estudio se divide en tres partes: estudio de transferencia de masa, suponiendo que el agua se comporta como una superficie sólida en un sistema monofásico isotérmico y permanente; estudio de transferencia de calor y masa para un sistema bifásico, de aire y agua; y finalmente el estudio de la transferencia de calor y masa para un sistema bifásico de aire y salmuera, con una fuente de calor radiativa.

Se estudian y definen las condiciones iniciales del sistema así como las condiciones de borde a utilizar en cada caso para generar los modelos en el software multifísico ANSYS FLUENT.

Los datos empíricos a partir de la literatura estudiada se comparan con los resultados obtenidos mediante el modelo computacional en el software, lo que permite validar los modelos generados.

1.2. ALCANCES

Existen simplificaciones, supuestos y variables que no se analizan en el presente trabajo, estos alcances son los siguientes:

- Los modelos se realizan en dos dimensiones, dado que se utiliza como supuesto que el problema a modelar presenta simetría en la medida del ancho, perpendicular a la dirección del viento.
- Las paredes del modelo de la Poza Solar son verticales en todos los casos. En general las paredes laterales de las pozas presentan ciertos ángulos con respecto al plano horizontal, ésta inclinación evita generar sombras en el fondo del sistema mejorando la absorción de la energía radiativa desde el ambiente por la poza solar.
- No se simula la Poza Solar para el clima de alguna localidad específica. Dado que cualquier sistema expuesto a cambios climáticos depende de diversas variables, en este caso, para modelar el sistema se tiene en cuenta los rangos de estas variables de diseño en que se utiliza generalmente este tipo de mecanismos, modelando dentro de las cotas seleccionadas para cada una de ellas.
- El estudio se restringe sólo hasta pozas solares de 12 (m) de largo. Las Pozas Solares pueden tener tamaños de 1 (m²) de área en laboratorios, así como pueden poseer grandes extensiones de área como las de un lago.
- En el presente trabajo no se estudian casos de lluvia o nevazón.
- Un lago posee entrantes y salientes de agua, ya sean en forma líquida o gaseosa. Para el caso de este informe, no se considera la existencia de un caudal de agua entrante o saliente hacia la poza, salvo la tasa de evaporación pues corresponde al parámetro estudiado.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO CUALITATIVO DE UNA POZA SOLAR

Una poza Solar [1] corresponde a un cuerpo de agua salina que presenta un aumento de temperatura significativo en su zona más profunda.

Las aplicaciones de las Pozas Solares son: el calentamiento y enfriamiento de edificios, piscinas y casas; el calentamiento de procesos industriales; la desalinización; la producción de energía eléctrica; el secado de cultivos agrícolas, entre otros.

Ejemplo tangible se puede encontrar en:

- Un proyecto realizado en el Mar Muerto, donde a partir de una Poza Solar de 210.000 m², se obtiene 5MW de Potencia Eléctrica, siendo posible obtener esta energía en bajas cantidades por un largo período de tiempo o altas tasa de energía en forma intermitente (una o dos horas al día) [2].

Las sales que generalmente se utilizan en la composición de la salmuera son: el cloruro de magnesio, el cloruro de sodio y el nitrato de sodio.

La Poza Solar se divide en tres estratos, que dependen de la concentración salina y la temperatura. Estos estratos corresponden a [1]:

- *UCZ (Upper Convective Zone)* o zona convectiva superior. Es una capa relativamente delgada que posee un bajo contenido salino, llegando hasta un valor cercano a 2% en peso, con temperatura y concentración salina uniforme a causa de la convección. Se posiciona en la parte superior de la poza.
- *NCZ (Non Convective Zone)* o zona no convectiva. No se produce convección natural, por lo que actúa como capa aislante transparente en reposo, finalmente la energía térmica en la NCZ sólo es transferida por

conducción y radiación. La temperatura y concentración salina de la NCZ en función de la profundidad presentan perfiles lineales crecientes.

- *LCZ (Lower Convective Zone)* o zona convectiva inferior. Presenta un alto contenido salino, llegando a salinidades de 20%p a 30%p y se alcanzan temperaturas los 80(°C) y los 90(°C). Posee temperatura y concentración salina uniformes a causa de la convección.

Los tres estratos descritos anteriormente se muestran en la Figura 2.1.

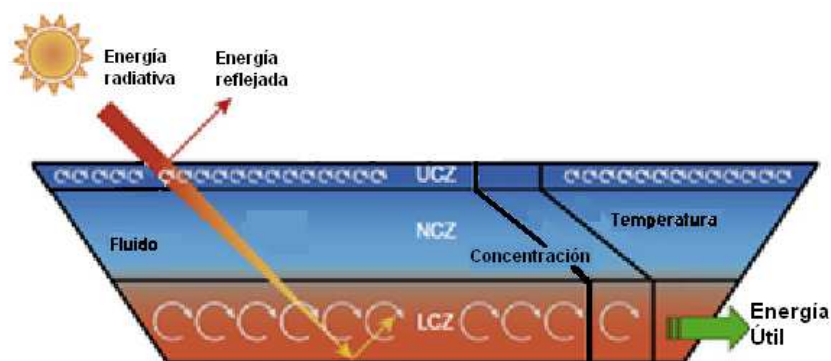


Figura 2.1: Estratificación y Balance Térmico de una Poza Solar

Las salmueras más concentradas presentan mayor densidad, lo que genera un gradiente salino que aumenta en función de la profundidad de la poza. Por otro lado, la energía térmica se almacena en el fondo de la poza por conducción y radiación, generando un gradiente de temperatura que aumenta en función de la profundidad.

Ambos gradientes influyen en el movimiento del fluido en sentidos contrarios, vale decir, las corrientes convectivas del agua a mayor temperatura son suprimidas por el aumento de la densidad. Así es como se forma la NCZ y actúa como un aislante transparente. En la Figura 2.2 se muestran las curvas de Salinidad, temperatura y densidad de la Poza.

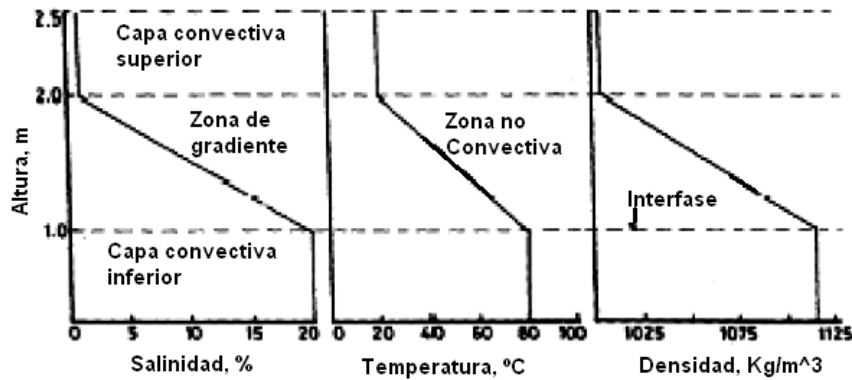


Figura 2.2: Curva de Salinidad (%), Temperatura (°C) y Densidad (Kg/m³) versus profundidad de la Poza Solar.

La concentración de sales en la zona de mayor profundidad llega a 20%p o 30%p y en la superficie la poza presenta un valor cercano a 2%p. Para aumentar la tasa de absorción de radiación solar la superficie interior de la poza se puede pintar de color negro.

A partir del estudio experimental realizado en Túnez [3] durante los meses cálidos (Julio, Agosto, Septiembre) los factores ambientales que afectan la estabilidad de la poza solar con sus respectivos rangos de diseño son los mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Factores ambientales que afectan la tasa evaporativa de la poza y sus rangos.

Factor ambiental	Magnitud Mínima	Magnitud Máxima	Unidad
Radiación Solar	100	380	W/m ²
Temperatura Ambiente	24	28	°C
Rapidez del viento	0	5	m/s
Temperatura LCZ	46	55	°C
Temperatura UCZ	24	27	°C

El porcentaje de Salinidad en la superficie de la Poza Salina es menor que el 5%p.

2.2. MARCO TEÓRICO PARA POZA SOLAR SIN GRADIENTE SALINO.

2.2.1. CASO SIMPLIFICADO A PLACA PLANA

La evaporación de aire en una poza se puede simplificar suponiendo una placa plana sobre la cual existe un flujo de aire a cierta velocidad [4] como se muestra en la Figura 2.3.

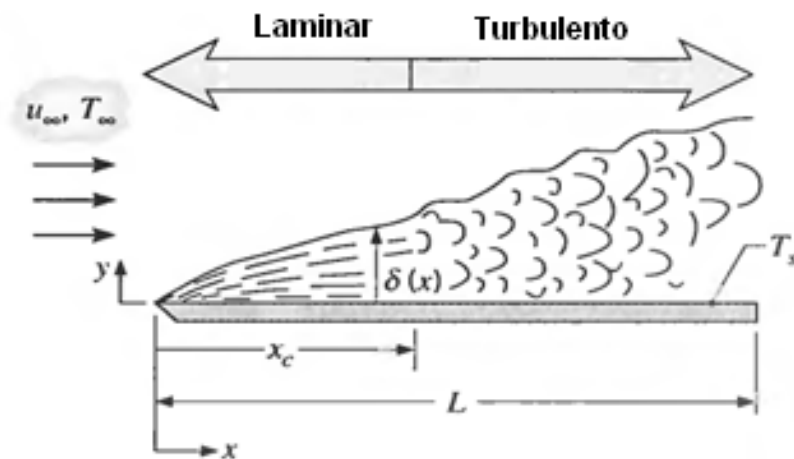


Figura 2.3: Esquema flujo de aire sobre una placa plana.

Las suposiciones de esta simplificación son:

- La superficie del agua que interactúa con el aire se comporta como un cuerpo rígido, vale decir, la superficie no presenta deslizamiento a causa de la fuerza de roce con el viento. Si la superficie del fluido es móvil, entonces esta analogía no es válida.
- Se supone la existencia de una analogía entre transferencia de calor y transferencia de masa. Se cumplen las analogías entre ciertos números adimensionales, en este caso el número de Nusselt con el número de Sherwood y el número de Prandtl con el número de Schmidt.

- Número de Sherwood [4]: es un número adimensional que proporciona una *“...medida de la transferencia de masa por convección que ocurre en una superficie...”*.
 - Número de Schmidt [4]: es un número adimensional que corresponde a la *“...medida de la efectividad relativa del transporte de momento y masa por difusión en las capas límite hidrodinámica y de concentración...”*.
- La analogía utilizada en esta sección no es válida para aquellos casos donde la transferencia de masa es alta, dado que varía el perfil de velocidades en la capa límite sobre la placa.

Las correlaciones están divididas dependiendo del tipo de flujo, se tienen tres casos:

- Flujo laminar: fluido que avanza sobre la placa no alcanza un Número de Reynolds mayor a $5 \cdot 10^5$.
- Flujo mixto: flujo en que ocurre una transición entre un flujo laminar y el flujo turbulento, con una velocidad y una viscosidad dadas, para algún valor de la coordenada sobre la placa, pasando por un Número de Reynolds de $5 \cdot 10^5$.
- Flujo turbulento: se referirá en este caso a un flujo que es turbulento a lo largo de toda la placa, vale decir, en ningún momento es laminar, incluso en el inicio de ella.

2.2.2. FORMULACIÓN EMPÍRICA PARA EL CÁLCULO DE LA TASA DE EVAPORACIÓN, CASO SIMPLIFICADO PLACA PLANA.

Un esquema del problema a tratar se presenta en la Figura 2.4. Donde se muestra una poza y los alrededores, sin embargo las ecuaciones presentadas sólo consideran la física sobre la poza y no la física del agua.

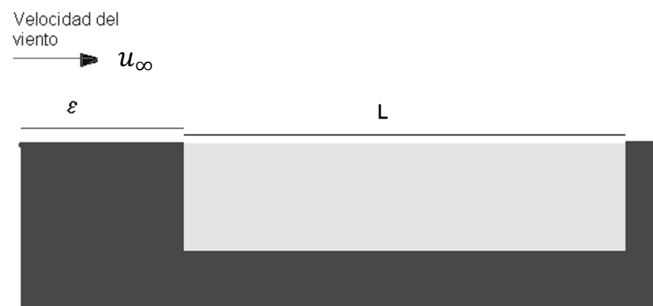


Figura 2.4: Esquema de Poza.

ϵ : ancho al borde de poza sin transferencia de calor o masa.

L : largo de la Poza

Se aplican ecuaciones de transferencia de calos al proceso de transferencia de masa, usando los grupos adimensionales apropiados de acuerdo a la analogía entre transferencia de calor y masa.

Primero es necesario definir los números adimensionales que se encuentran en el sistema.

Número de Reynolds

$$Re_L = \frac{u_{\infty} L}{\nu}$$

Ecuación (2.1)

Número de Schmidt

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

Ecuación (2.2)

El Número de Sherwood, teniendo en cuenta la superficie que recorre el viento es [4]:

$$\overline{Sh}_L = \overline{Sh}_{L/\varepsilon=0} \cdot \frac{L}{L-\varepsilon} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{L} \right)^{\frac{(p+1)}{(p+2)}} \right]^{p/(p+1)} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde: Para flujo laminar $p = 2$ y para Flujo turbulento $p = 8$

La formulación para el Número de Sherwood, teniendo en cuenta sólo la superficie recorrida sobre el fluido, $\overline{Sh}_{L/\varepsilon=0}$ para los distintos flujos es:

Flujo Laminar $\overline{Sh}_{L/\varepsilon=0} \equiv \frac{\overline{h_{m,x}} x}{D_{AB}} = 0,664 Re_x^{1/2} Sc^{1/3} \quad Sc \geq 0.6$ Ecuación (2.4)

Flujo Mixto y turbulento $\overline{Sh}_{L/\varepsilon=0} = \left(0,037 Re_L^{4/5} - A \right) Sc^{1/3}$ Ecuación (2.5)

Donde $\left[\begin{array}{l} 0.6 \leq Sc \leq 60 \\ Re_{x,c} \leq Re_L \leq 10^8 \end{array} \right]$ Ecuación (2.6)

$$A = 0,037 Re_{x,c}^{4/5} - 0,664 Re_{x,c}^{1/2}$$

Si el Número de Reynolds crítico es $Re_{x,c} = 5 \cdot 10^5$, entonces $A = 871$.

Para Flujo Completamente Turbulento, $Re_{x,c} = 0$, entonces $A = 0$

Conociendo el \overline{Sh}_L , se puede calcular el Coeficiente de transferencia de masa por convección promedio $\overline{h_{m,L}}$ (m/s):

$$\overline{h_{m,L}} = \overline{Sh}_L \left(\frac{D_{AB}}{L} \right) \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

A partir de los datos anteriores se tiene que la tasa evaporativa, n_A (Kg/s), es:

$$n_A = \bar{h}_m La (\rho_{A,S} - \rho_{A,\infty}) \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

La Humedad Relativa, ϕ_∞ , expresada como fracción, está dada por:

$$\phi_\infty = \frac{\rho_{A,\infty}}{\rho_{A,Sat}(T_\infty)} \quad \rho_{A,S} = \rho_{A,Sat}(T_S) \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

La Tasa evaporativa se calculará de la siguiente forma:

$$n_A = \bar{h}_m La [\rho_{A,Sat}(T_\infty) - \phi_\infty \rho_{A,Sat}(T_\infty)] \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

2.2.3. CASO DE EVAPORACIÓN EN UNA POZA SIN GRADIENTE SALINO, BAJO CONVECCIÓN NATURAL.

En este caso la condición inicial de velocidad del aire es nula, la temperatura del aire es menor que la temperatura del agua, lo que implica que el movimiento del aire será generado a causa de la transferencia de calor desde el agua al aire, ocurriendo convección natural. Un esquema de un experimento tipo para calcular la tasa de evaporación [5] se muestra en la Figura 2.5.

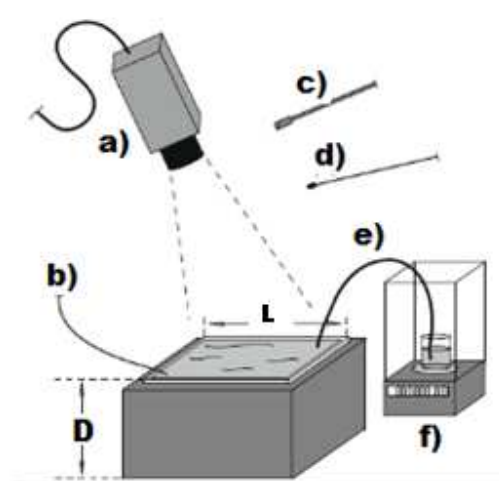


Figura 2.5: Esquema de un tanque para cálculo de la tasa de evaporación en forma empírica. a) Cámara infrarroja para medir la temperatura en la superficie, b) sensor de temperatura del cuerpo de agua; c) sensor humedad relativa; d) sensor temperatura del aire; e) tubo sifón agua; f) balanza eléctrica para medidas de evaporación. Fuente: S. M. Sower [5].

La evaporación en estas condiciones depende principalmente de la diferencia de densidad en el aire causada por la diferencia de temperatura. Se tiene [5] que la transferencia de masa, $n_A(Kg/m^2s)$, es:

$$n_A = h_m \cdot \Delta\rho_{wv} \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D_{ab}} \quad \Delta\rho_{wv} = \rho_{wv,s} - \rho_{wv,\infty} \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

$$n_A = \frac{Sh \cdot D}{L} (\rho_{wv,s} - \gamma \rho_{wv,\infty}) \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

$$Sh = B \cdot Sc^{1/3} Ra^n \quad Ra = \frac{g \Delta\rho L^3}{\bar{\rho} \nu \alpha} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho_s \quad \bar{\rho} = \frac{\rho_\infty + \rho_s}{2} \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

La relación entre el Número de Sherwood, Sh, y el Número de Rayleigh, Ra, [5] es:

$$Sh = 0,23 \cdot Sc^{1/3} \cdot Ra^{0.321} \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

Por otro lado según Boelter, la relación entre el Número de Sherwood, Sh, y el número de Rayleigh, Ra, es:

$$Sh = 0,645 \cdot Sc^{1/3} \cdot Ra^{0.241} \quad \text{Ecuación (2.17)}$$

El número de Rayleigh corresponde a un número adimensional que entrega la noción del tipo de transferencia de calor que se produce en el fluido. Para $Ra < 10$ la transferencia de calor se produce completamente por conducción, mientras que para $Ra > 1000$ la transferencia de calor es mayoritariamente a causa de la convección.

Dado que ambas relaciones provienen de estudios experimentales, se obtendrá un rango entre el que debe ocurrir la tasa de evaporación del modelo en estudio de la poza.

El cálculo para obtener las densidades ρ_∞ y ρ_s [6], que corresponden a la densidad del aire húmedo ambiente y la densidad del aire húmedo en la superficie de la poza, se puede observar en el Anexo C.

En la Figura 2.6, se muestra un esquema del caso de Evaporación en una poza sin gradiente salino y con velocidad inicial del viento nula.

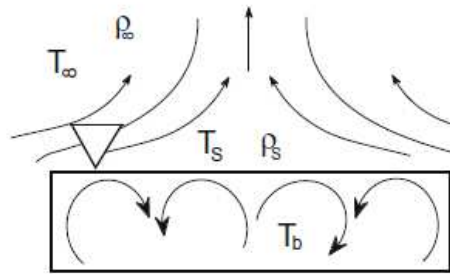


Figura 2.6: Esquema del proceso de transporte en el aire y agua para un tanque de agua.
Fuente: S. M. Bower [5].

Se observa la corriente convectiva formada en el agua y la corriente de aire formada a causa de la transferencia de calor.

2.2.4. CASO DE EVAPORACIÓN EN UNA POZA SIN GRADIENTE SALINO, BAJO CONVECCIÓN FORZADA.

En el caso de convección forzada la condición inicial de velocidad del aire es no nula, la temperatura del aire es menor que la temperatura del agua. En este caso la evaporación del agua del sistema tiene como variables de estudio la diferencia de temperatura entre la atmósfera y la superficie del agua, al igual que la velocidad del viento y el tamaño de la poza. En la Figura 2.7 se muestra un esquema del sistema bajo convección forzada.

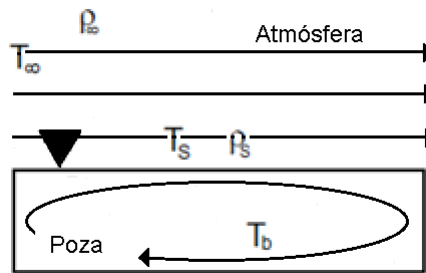


Figura 2.7: Esquema de movimiento del cuerpo de agua y del aire para el caso de convección forzada.

La tasa de evaporación en embalses está dada por la siguiente fórmula empírica [7]:

$$E = H_v(e_s - e_a)$$

$$e_s = 0,611 \cdot 10^{(7,5 \cdot T / (T + 237,3))}$$

Ecuación (2.18)

$$HR = \frac{e_a}{e_s}$$

E : Tasa de evaporación de agua en la atmósfera, en (mm/día)

e_s : Presión de vapor de saturación a la temperatura de la superficie de la poza en (kPa)

T : temperatura en °(C)

e_a : Presión de vapor del aire medida a 2(m) a la temperatura de la atmósfera, en (kPa)

HR : Humedad relativa en %

H_v : *Coeficiente de transferencia da vapor de agua, en (mm/día · kPa)*

H_v depende de la velocidad del viento y de la superficie del cuerpo de agua, que se determina mediante la función $f(S)$.

Existen diferentes relaciones dependientes de la superficie de la poza para $f(S)$:

- Molina (2004): tanque evaporímetro clase A, de $S = 1,144(m^2)$.

$$f(S) = 3,337$$

- Brutsaert (1982): válida para el rango $0,25(m^2) < S < 25(m^2)$

$$f(S) = 3,623 \cdot S^{-0,066}$$

Para el caso de esta memoria se utiliza la relación de Brutsaert.

2.3. MARCO TEÓRICO PARA EL CASO DE UNA POZA SOLAR, CON GRADIENTE SALINO.

Las pozas solares nacen a partir de la diferencia de densidades en el sistema. Esta diferencia de densidad se encuentra en función de dos factores, la temperatura y la salinidad del fluido de la poza, en cada punto de ella [8]. Es por lo anterior, que la función de densidad está dada por:

$$\rho_w = \rho_R [1 - \alpha(T_w - T_{wR}) + \beta(S - S_R)] \quad \text{Ecuación (2.19)}$$

En este caso el subíndice "R" significa a partir de una posición de referencia.

Es posible describir la difusividad:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \omega \frac{\partial S}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[D(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] \quad \text{Ecuación (2.20)}$$

Si $\omega = 0$, entonces el transporte se desarrolla sólo por difusión.

En la Figura 2.8 se puede observar que el gradiente de temperatura aumenta con la profundidad en la Zona No Convectiva, llegando a un máximo y luego decreciendo. El espesor óptimo para la zona no convectiva es el valor $Z(m)$ en el punto de regreso.

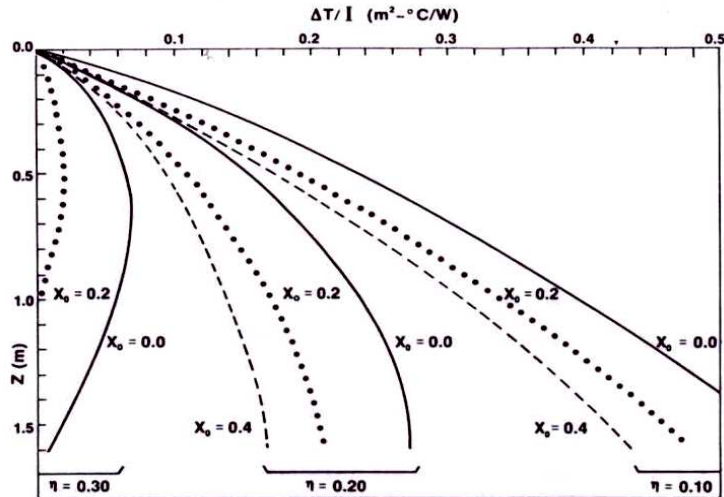


Figura 2.8: Rendimiento promedio anual en estado estacionario para una poza clara. Diferentes valores de: espesor de capa no convectiva, espesor de la capa superficial y carga promedio. Fuente: F. Zangrado [8]

La forma del gradiente de salinidad depende de: las salinidades en los estratos convectivos superior e inferior, de la distribución de la temperatura y de la difusividad local.

Las pozas operan entre 0(°C) y 110(°C) , Punto de ebullición de las soluciones a altas concentraciones salinas.

Otro dato importante es el hecho que la saturación se alcanza en 26%p y depende débilmente de la temperatura. Además es difícil mantener la superficie de la poza en 0%p, por lo tanto, en general se mantiene a un 2%p de salinidad.

Entre los rangos anteriores de salinidad, se puede expresar la difusividad en función de la temperatura, T(°C), y la salinidad, S(%p) como:

$$D(T, S) = [0.58 + 0.03T + 0.0002T^2 + 0.001S^2]10^{-9} \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad \text{Ecuación (2.21)}$$

Dado que las Pozas Solares no son un sistema que alcance su estabilidad, si no que esta debe ser mantenida (es un sistema en estado transiente), se deben tener en cuenta dos limitaciones importantes para su operatividad:

- Las capas de la poza deben permanecer estratificadas, por lo que se debe prevenir la formación de convección interna.
- Se debe mantener el espesor de diseño de la capa no convectiva. Es decir, los bordes de la estratificación deben permanecer estáticos en el espacio o a la misma distancia relativa entre ellos.

La condición mínima de estabilidad es que la densidad sea constante en Z, condición denominada “Estática”. Esto implica:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_R} = -\alpha\Delta T + \beta\Delta S \geq 0 \quad R_p = \frac{\beta\Delta S}{\alpha\Delta T} \geq 1 \quad \text{Ecuación (2.22)}$$

Esta condición de estabilidad Estática es marginal, dado que cualquier perturbación en el sistema iniciará una mezcla, por lo tanto para mantener una condición de estabilidad dinámica, $\Delta\rho/\rho_R \geq 0$. Este valor finito está relacionado con la cantidad de trabajo requerido para mezclar el fluido, y la cantidad de energía disponible para realizar el trabajo de mezcla en el fluido está dada por el Número de Richardson (R_i), que implica que la variación de densidad debe ser mayor que algún valor relacionado con el campo de velocidad local de la perturbación.

Las variaciones en el campo de movimiento del fluido se pueden producir por:

- Recirculación del fluido por extracción de energía.
- Inyección o extracción del fluido para mantención del gradiente.
- Movimiento de la capa superficial por movimiento del viento.
- Calentamiento de la pared lateral.

Otra forma de entender la condición de estabilidad del flujo doblemente difusivo, referido a los gradientes de temperatura y salinidad de la poza solar, donde ambos incrementan con la profundidad, es midiendo la fuerza impulsora que inicia o retarda el movimiento en el fluido. Este movimiento está dado por el Número de Rayleigh térmico y de salinidad.

$$Ra_T = \frac{g\alpha\Delta TH^3}{\nu D_T} \quad Ra_S = \frac{g\beta\Delta SH^3}{\nu D_T} \quad \text{Ecuación (2.23)}$$

La razón entre Ra_S y Ra_T es R_p .

Es interesante nombrar el “Efecto de pared”. Este efecto es importante, dado que un flujo de calor lateral puede calentar o enfriar un fluido adyacente provocando movimiento vertical en éste. Nuevamente la fuerza impulsora está dada por el Número de Rayleigh , donde la condición crítica será: $Ra = 1.5 \cdot 10^4$, y la diferencia de temperatura estará dada entre la superficie y el fluido no perturbado.

Cuando la pared se encuentra inclinada el fluido cerca de ésta se encuentra en una Isopicna (línea de densidad constante), por lo que entre el fluido y la pared la densidad es diferente y el fluido experimenta una fuerza de empuje, que perturbará el sistema.

En las pozas solares los efectos del calentamiento por radiación solar [9] son más pronunciados durante las estaciones calurosas. Existen dos zonas críticas en la poza, una bajo la superficie de la poza y otra cercana al fondo de la poza, en estas zonas el parámetro de estabilidad es positivo y su espesor varía con la estación del año, especialmente la zona del fondo de la poza. Se observa en la Figura 2.9 la zona de estabilidad en la poza, donde el parámetro de estabilidad, F_s es menor o igual que 0.

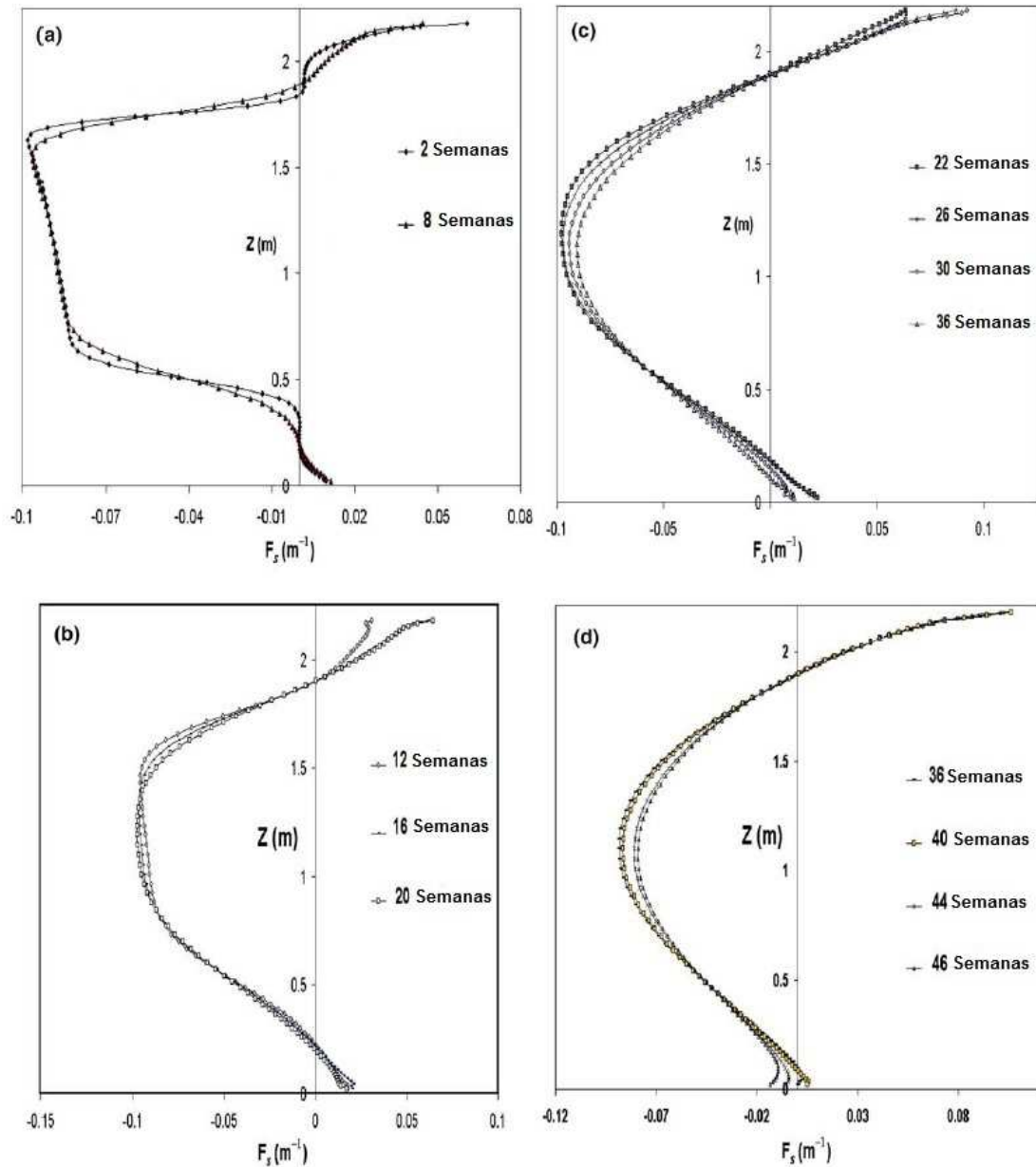


Figura 2.9: Parámetro de estabilidad en la poza en función de las estaciones del año: a) Invierno, b) Primavera, c) Verano, d) Otoño. Fuente: Ridha Ben Mansour [9].

Además, la presencia de extracción de calor con un efecto de enfriamiento en el fondo de la poza tiende a estabilizar el sistema en aquella sección crítica del fondo de la poza salina. Finalmente resultados experimentales han mostrado que las pozas con buena transparencia en el agua tienden a

desarrollar inestabilidades, mientras que aquellas pozas con baja transparencia tienden a ser más estables. En la Figura 2.10 se muestra el efecto de la transparencia del agua en la temperatura de la poza y en su parámetro de estabilidad.

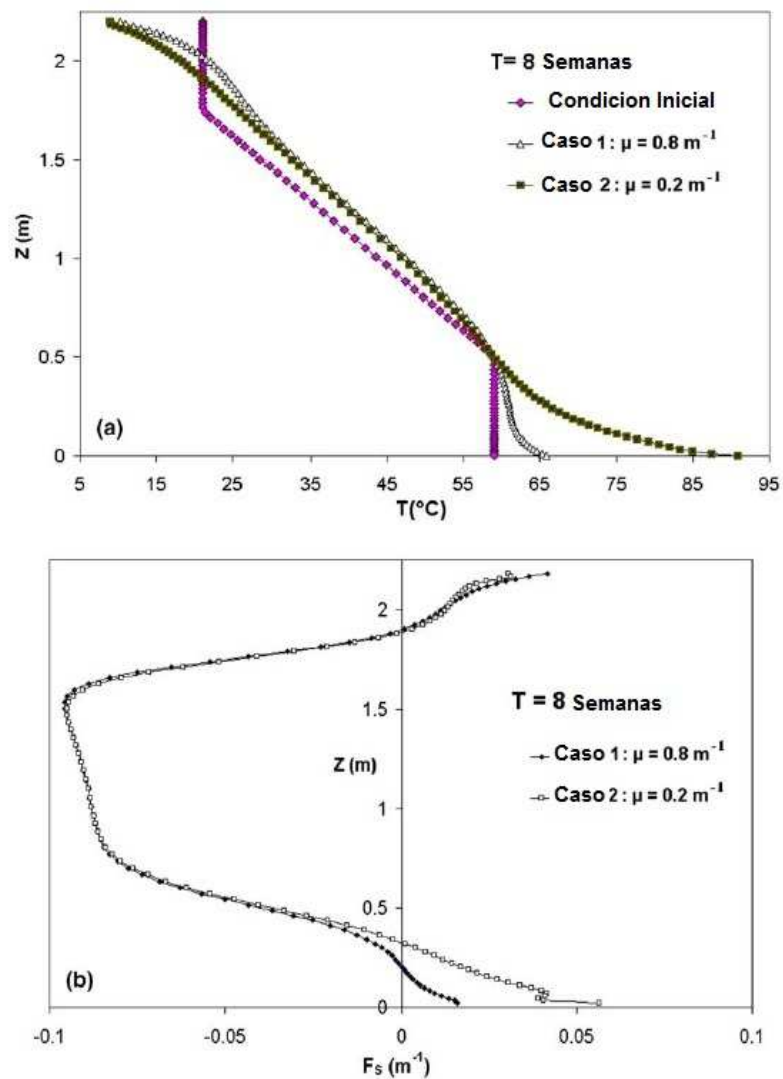


Figura 2.10: Efecto de la transparencia del agua en: a) curvas de temperatura; b) curva de parámetro de estabilidad, ambos en función de la profundidad de la poza. Fuente: Ridha Ben Mansour [9].

La Salinidad es un parámetro de gran importancia en las Pozas Solares, es por ello que en la Figura 2.11 se muestra la Salinidad en función de la profundidad para diferentes instantes de tiempo.

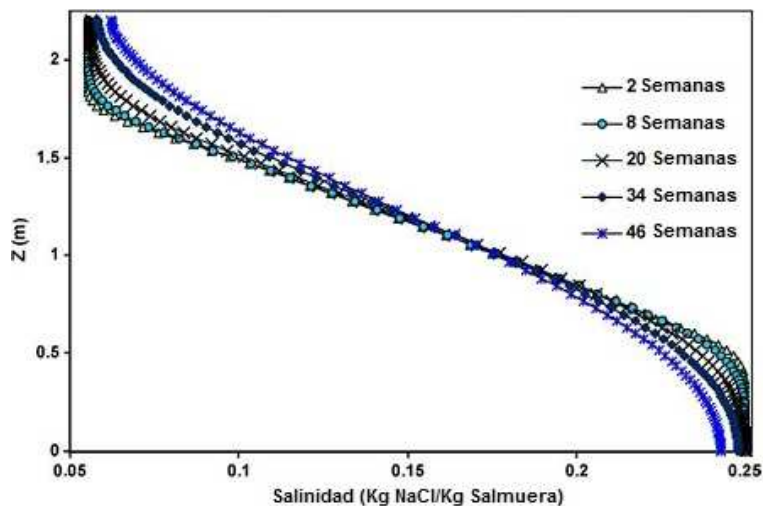


Figura 2.11: Salinidad a través del tiempo. Fuente: Ridha Ben Mansour [9].

La zona convectiva inferior, como ya se ha mencionado actúa como un colector solar, esto ocurre cuando la radiación solar incidente llega al fondo de la poza y provee calor a la misma. Cuando la temperatura en la zona convectiva inferior alcanza un valor crítico aparecen los movimientos convectivos.

Se debe comprender que los movimientos convectivos en la zona convectiva superior son causados principalmente por el viento, mientras que los movimientos convectivos en la zona convectiva inferior son causados por la diferencia de temperatura vertical cuando el fondo de la poza es calentado por radiación solar.

Es posible representar experimentalmente el aumento de temperatura en el fondo de la poza a causa de la radiación solar colocando un intercambiador de calor de cobre en el fondo de la poza de modo de proveer energía en forma uniforme en la base de la poza solar, vale decir, entregando temperatura constante desde el fondo [10]. En base a los resultados obtenidos por esta experiencia experimental la estabilidad en la zona no convectiva se mantiene.

Por otro lado, de acuerdo a los estudios de [11] se concluyó que la tasa evaporativa decrece al aumentar el porcentaje salino en el agua a causa de la reducción en la presión del vapor de agua en la superficie de la poza.

Algunos parámetros que influenciarán sobre la tasa de evaporación serán: La geometría del sistema, la presencia de material suspendido o disuelto en el agua, actividad biológica, humedad relativa del aire, presencia de químicos u otros aditivos en el agua, temperatura del aire y del agua, entre otros.

2.4. FÓRMULA PARA CÁLCULO DE DIFERENCIA PORCENTUAL.

Para calcular la diferencia porcentual, e , entre el cálculo proveniente desde una fórmula empírica y el resultado proveniente del modelo computacional, se utiliza la fórmula:

$$e(\%) = \left(\frac{\text{Tasa evaporativa computacional}}{\text{Tasa evaporativa de Referencia}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad \text{Ecuación (2.24)}$$

Luego:

$e > 0$, Si Cálculo Computacional $>$ Cálculo de Referencia

$e < 0$, Si Cálculo Computacional $<$ Cálculo de Referencia

2.5. ECUACIONES UTILIZADAS PARA EL MODELO COMPUTACIONAL.

Mediante el uso de ANSYS FLUENT se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía suponiendo un estado transiente.

Con un breve análisis del sistema se puede explicar la utilidad de cada una de las ecuaciones a utilizar en la solución del modelo computacional. El punto de interés del estudio es obtener el cálculo de la tasa de evaporación del sistema, lo que implica existe transferencia de masa siendo de utilidad la ecuación de conservación de la misma. El sistema consta de fluidos que pueden estar o no en movimiento y que además son capaces de transferir movimiento entre sí ya que se encuentran en contacto, generando transferencia de momento entre una fase y otra. Finalmente existe transferencia de calor

entre la fase líquida y la fase gaseosa, dado que se requiere energía para que el fluido pueda evaporar, siendo activada de esta forma la ecuación de conservación de energía. Por otro lado, se presentan mezclas de especies en ambas fases, gaseosa y líquida, por lo tanto se debe mantener la conservación de las especies en el sistema modelado o ecuación de transporte.

2.5.1. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MASA.

Inicialmente es necesario comprender el significado de la conservación en la masa en una ecuación:

$$\begin{aligned} & \textit{Tasa de incremento de masa en el fluido} \\ & = \textit{Tasa neta del flujo de masa en el fluido} \end{aligned}$$

La ecuación de continuidad es válida tanto para fluidos compresibles como fluidos incompresibles. Esta ecuación está dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = S_m ; \quad \mathbf{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad \text{Ecuación (2.25)}$$

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³)

μ : Tensor de velocidad (m/s)

t : Tiempo (s)

u : Velocidad del fluido en el eje x (m/s)

v : Velocidad del fluido en el eje y (m/s)

w : Velocidad del fluido en el eje z (m/s)

S_m : Fuente de masa (Kg/m³s)

2.5.2. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MOMENTO.

La ecuación de continuidad de momento se puede comprender como:

$$\begin{aligned} & \text{Incremento de la tasa del momento en el fluido} \\ & = \text{Suma de las fuerzas en el fluido} \end{aligned}$$

Para el caso de dos dimensiones se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.26)}$$

ν : viscosidad dinámica (s/m^2)

p : Presión (Pa)

S_{Mx}, S_{My} : Fuente de momento en el eje correspondiente (Pa/m)

2.5.3. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.

La ecuación de conservación de la energía se puede comprender como:

$$\begin{aligned} & \text{Incremento de la energía en el fluido} \\ & = \text{Calor adquirido por el fluido} \\ & + \text{Trabajo realizado por el fluido} \end{aligned}$$

Se tiene la ecuación 2.21 para la conservación de la energía en tres dimensiones.

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad} T) + \Phi + S_i \quad \text{Ecuación (2.27)}$$

$$\Phi = \nu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\text{div} \mathbf{u})^2$$

Φ = función de disipación por causa de efectos viscosos.

ν : viscosidad dinámica (s/m^2)

λ : Viscosidad secundaria (s/m^2)

i : Energía interna (J)

k : Conductividad térmica (W/mK)

T : temperatura (K)

S_i : Fuente de Energía ($W \cdot Kg/m^3$)

2.6. ALGORITMOS DE ANSYS PARA RESOLVER PROBLEMAS EN ESTADO ESTACIONARIO Y TRANSIENTE.

Para resolver los problemas de tipo computacional, existen métodos de discretización de los valores a calcular, vale decir, de la velocidad en cada uno de sus ejes, de la presión y de las variables de transporte que se desee calcular.

Los Algoritmos utilizados en el software multifísico ANSYS FLUENT son [12]:

SIMPLE: Corresponde a un método semi implícito en que se supone un campo de presión conocido para resolver mediante el algoritmo el campo de velocidades, en cada iteración se corrigen ambos campos hasta converger a una solución. Este método se recomienda para resolver problemas en estado estacionario.

SIMPLEC: A diferencia del método SIMPLE las ecuaciones de momento son manipuladas con mayor precisión, por lo que el resultado es más certero pero el uso de recursos computacionales es mayor.

PISO: Éste método está recomendado para trabajar con sistemas en estado transiente, mientras que los métodos SIMPLE y SIMPLEC se recomiendan para soluciones en estado estacionario. A diferencia de los métodos anteriores que poseen una única corrección de las variables en cada iteración, PISO posee dos correcciones para las variables de velocidad y en la variable de presión. Es por lo mismo que este método tiene mayor precisión que los nombrados anteriormente.

3 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL PARA DETERMINAR LA TASA DE EVAPORACIÓN PARA UN MODELO MONOFÁSICO.

3.1. DATOS INICIALES DE LA SIMULACIÓN.

Las dimensiones iniciales de la poza son: 2 (m) de largo por 1 (m) de ancho. Para esta simulación se considera un régimen permanente e iguales temperaturas del aire y el agua de la poza. Por lo tanto, la tasa de evaporación está controlada únicamente por la transferencia de masa.

En este capítulo se estudia la influencia de la velocidad del viento paralela a la superficie de la poza (que se supone isoterma) para diferentes tipos de flujo, se estudia también la influencia de la humedad relativa del aire y la influencia que tiene el tamaño de la poza en la tasa de evaporación.

Los datos iniciales para el estudio del modelo son los siguientes:

$T_{\infty} = 25^{\circ}C$, *Temperatura Ambiente*

$HR = 50\%$, *Humedad Relativa*

$T_{AGUA} = 25(^{\circ}C)$, *Temperatura del agua*

$L = 2(m)$, *Largo de la Poza*

$a = 1(m)$, *Ancho de la Poza*

$\nu = 0,0000157 (Pa \cdot s)$, *Viscosidad cinemática del Aire a 25($^{\circ}C$)*

$D_{AB} = 0,000026(m^2/s)$, *Difusividad del vapor de agua en el aire*

$\nu_{AIRE} = 39,13(m^3/Kg)$, *Volúmen específico.*

$Sc = 0,60384615$, *Número de Schmidt*

Se realiza un estudio de sensibilidad al mallado del sistema y altura de la región, para luego estudiar la velocidad del viento caso a caso desde 0,3 a 5 (m/s).

La influencia de la Humedad Relativa (HR) sobre la tasa de evaporación de la poza solar se calculó entre un 10% y un 90% de HR. A partir de la HR se obtienen los datos de fracción másica de aire y agua como muestra la Tabla 3.1, útiles para realizar la simulación. La Humedad Absoluta se obtiene como dato a partir de la Carta Psicrométrica (ver ANEXO A).

Tabla 3.1: Cálculo de fracción másica de aire y agua a partir de la Humedad Relativa a 25(°C)

HR%	Humedad Absoluta (Kg_{vapor}/Kg_{aire seco})	Fracción másica de aire	Fracción másica de agua
100%	0,020	0,980	0,0196
90%	0,018	0,982	0,0177
80%	0,016	0,984	0,0157
70%	0,014	0,986	0,0138
60%	0,012	0,988	0,0119
50%	0,010	0,990	0,0099
40%	0,008	0,992	0,0079
30%	0,006	0,994	0,0060
20%	0,004	0,996	0,0040
10%	0,002	0,998	0,0020

3.2. ESTUDIO DEL MODELO.

Para este caso se estudia el caso de una Poza de 2 (m) de largo, con un flujo de aire turbulento a 5 (m/s), a una temperatura de 25 (°C) y 50% HR en el aire. El estudio se realiza contrastando los resultados computacionales con la simplificación a placa plana para la superficie del agua.

3.2.1. ESTUDIO DE MALLA.

Para realizar un estudio de mallado es necesario determinar el tamaño máximo que pueden tener los elementos de la malla sin influenciar sobre el problema físico del sistema a analizar. Para llevar a cabo este estudio se comenzó con cierto número de elementos iguales y de forma cuadrada en el sistema, determinándose la tasa de evaporación en la superficie de salida de la región de análisis. En la Tabla 3.2, se muestra la cantidad de elementos

utilizados para la modelación del sistema y la Tasa de Evaporación correspondiente.

Tabla 3.2: Número de Elementos versus Tasa de Evaporación.

Número de elementos	Tasa Evaporación $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right)$
406	23,2
36.045	35,8
64.080	35,7

Teniendo en cuenta la Tabla 3.2 se presenta el Gráfico 3.1.

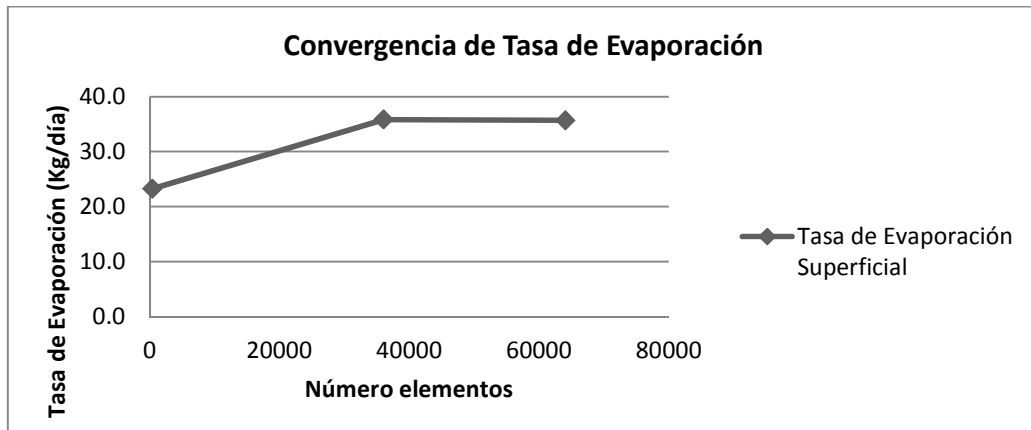


Gráfico 3.1: Sensibilidad de la Tasa de Evaporación al número de elementos de malla.

Se concluye por lo tanto que para el caso de una malla de 64.080 elementos cuadrados el modelo converge a una tasa evaporativa, por lo tanto, no existirá un aumento significativo en la precisión de la solución del problema si se modelara con una malla de un mayor número de elementos. Por lo tanto, para este caso se selecciona la tercera opción de 64.080 elementos.

Por otro lado existe una aplicación de ANSYS, que posibilita la generación de un mallado no uniforme con elementos rectangulares, que ordena los elementos

de mayor a menor longitud de lado o viceversa sobre algún borde seleccionado de la figura, lo que permite disminuir el tamaño de elemento en ciertas regiones donde los gradientes de transferencia de calor y masa son mayores y, por lo tanto, requieren un análisis numérico mayor. Esta aplicación se denomina "Bias" o parcelamiento y representa la razón de largo entre el elemento de mayor longitud y el elemento de menor longitud. En la Tabla 3.3 se muestra la relación entre el número de elementos, el Bias seleccionado y la Tasa de Evaporación obtenida.

Tabla 3.3: Estudio mallado, tasa de evaporación con respecto al bias.

ESTUDIO DE MALLADO					
Número de elementos	Descripción Horizontal		Descripción Vertical		Tasa Evaporativa Computacional $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right)$
	Número Elementos	Bias	Número Elementos	Bias	
80,000	400	5	200	5	34,75
45,000	300	5	150	5	34,77
30,000	250	6	120	6	34,80

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.3 se muestran en el Gráfico 3.2.

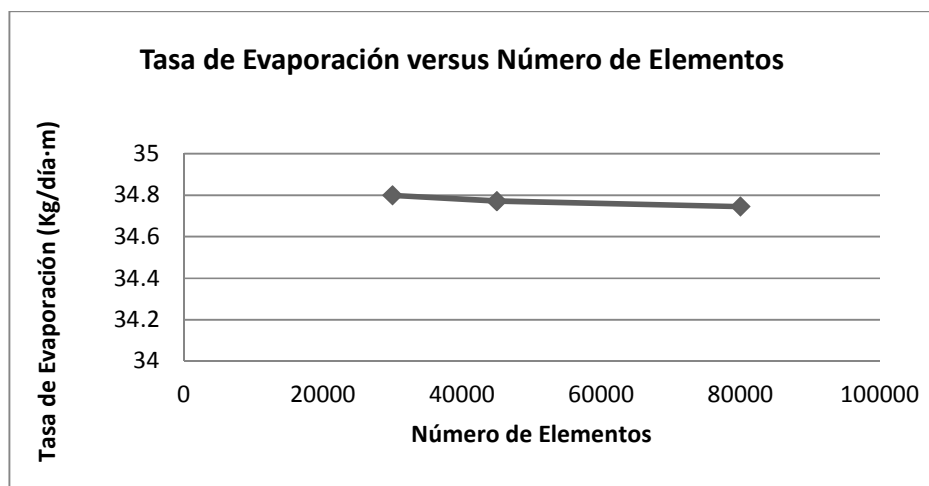


Gráfico 3.2: Tasa de Evaporación Versus número de elementos.

Se observa que la diferencia entre realizar el cálculo con 80.000 elementos y realizarlo con 30.000 elementos es despreciable. Por lo tanto, se concluye que efectivamente el Bias mejora la eficiencia del cálculo. La diferencia porcentual entre el valor de tasa de evaporación para los 80.000 elementos y la tasa de evaporación para los 30.000 elementos es de 0,15%, por lo tanto, se trabaja con la malla de 30.000 elementos.

A continuación en la Figura 3.1, se muestra la disposición del tamaño de los elementos en el modelo. Es posible visualizar que en la esquina inferior izquierda los elementos son de un tamaño menor, por lo tanto la precisión del cálculo será mayor en aquel sector.

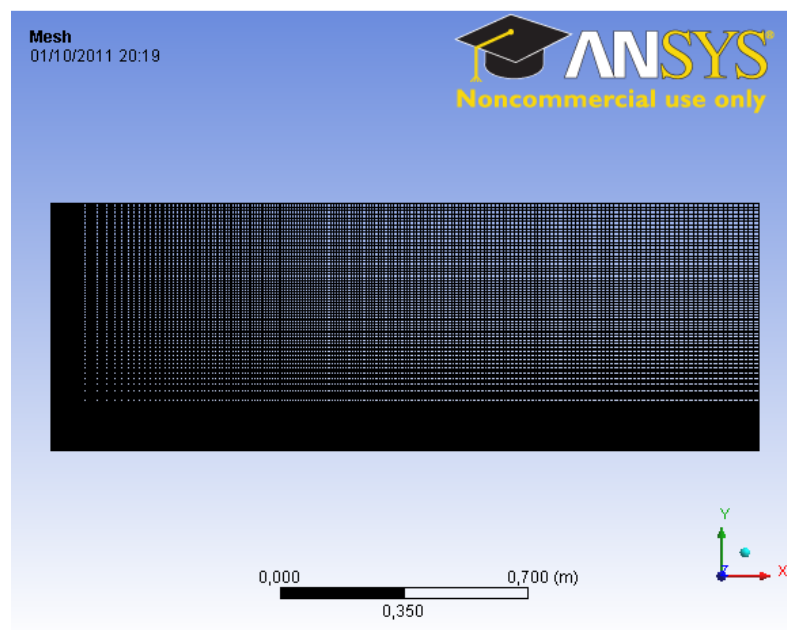


Figura 3.1: Mallado del volumen de control a modelar, con 2(m) de largo por 0,7(m) de alto.

3.2.2. ESTUDIO DE ALTURA EN LA REGIÓN DE ANÁLISIS.

Este estudio posee como finalidad no sobreestimar la altura en la que es necesario realizar la simulación. En la Tabla 3.4, se muestran los resultados obtenidos al disminuir la altura desde 1 (m) hasta 0,5 (m).

De acuerdo a la Tabla 3.3, en el eje horizontal se divide la sección en 250 elementos con un bias igual a 6, por otro lado, en el eje vertical el número de elementos debe cambiar de modo que el elemento de menor tamaño mantenga sus dimensiones en cada simulación. El elemento de menor tamaño posee una longitud de 0,0028 (m) vertical y horizontalmente, el número de elementos y la tasa evaporativa para cada caso se muestra en la Tabla 3.4

Tabla 3.4: Estudio de altura del volumen de control para estudio de la tasa evaporativa.

ESTUDIO DE ALTURA		
Altura del volumen de control (m)	Número de elementos eje vertical	Tasa Evaporativa Computacional $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right)$
1	160	34,75
0,7	120	34,74
0,5	75	35,26

A partir de los datos de la Tabla 3.4 se genera el Gráfico 3.3.

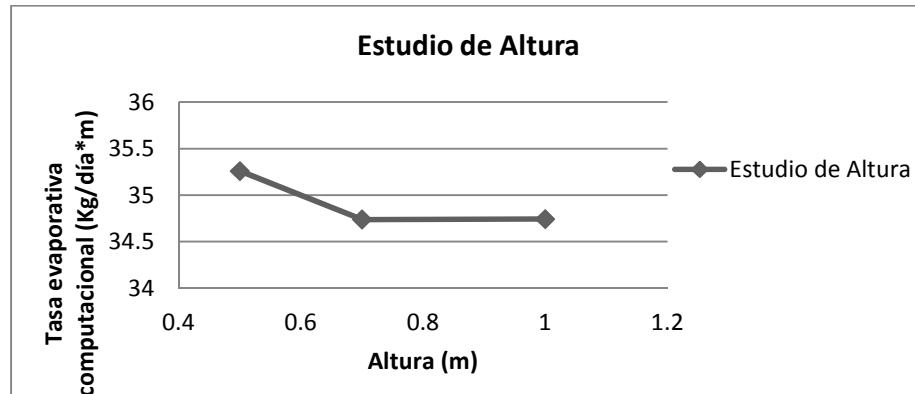


Gráfico 3.3: Tasa de evaporación versus altura atmósfera.

Observando los resultados obtenidos de la Tabla 3.4, se puede concluir que la tasa evaporativa converge a medida que aumenta la altura del plano simulado. La diferencia porcentual entre la tasa evaporativa para una simulación de 0,7(m) de altura y la tasa evaporativa para una simulación de 1 (m) de altura es de 0,01%. Por lo tanto, se utilizará 0,7 (m) de altura.

3.3. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA TASA DE EVAPORACIÓN PARA UN MODELO MONOFÁSICO.

3.3.1. TASA DE EVAPORACIÓN EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, CON HR=50%.

Para calcular la tasa evaporativa en forma empírica se utilizan las ecuaciones presentadas en el Marco Teórico. La simulación se realiza para una poza de 2 (m) de largo para observar la influencia de los diferentes flujos sobre la superficie de la poza, se observa que para diferentes velocidades el flujo en la poza varía desde laminar a turbulento, por lo tanto entre:

- 0,3 y 3 (m/s) $Re < 5 \cdot 10^5$, por lo tanto, el flujo es Laminar.
- 4 y 5 (m/s) $Re > 5 \cdot 10^5$, por lo tanto, el flujo es Mixto

Se calculada para los 4 y 5 (m/s) un flujo completamente turbulento, con el modelo de turbulencia K- ϵ .

En la Tabla 3.5, se muestran los resultados obtenidos a partir de los cálculos empíricos y de los resultados a partir del modelo computacional. Seguido de esto se muestra la diferencia porcentual, e(%), que existe entre ambas tasas evaporativas.

Tabla 3.5: Estudio de la tasa evaporativa en función de la velocidad del viento, con HR=50%.

TASA EVAPORATIVA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO					
$u \left(\frac{m}{s}\right)$	Re_L	Tasa evaporativa empírica $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m}\right)$	Tasa evaporativa Total del modelo $na \left(\frac{Kg}{s \cdot m}\right) \left[na \left(\frac{Kg}{día \cdot m}\right) \right]$	Tasa evaporativa Normalizada del modelo $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m^2}\right)$	e %
0,3	3,8e4	2,79	3,63e-5 [3,14]	1,57	11,3
0,5	6,4e4	3,60	4,65e-5 [4,01]	2,01	10,4
0,8	1,0e5	4,55	5,83e-5 [5,04]	2,52	9,8
1	1,3e5	5,08	6,51e-5 [5,62]	2,81	9,6
2	2,5e5	7,19	9,17e-5 [7,93]	3,96	9,3
3	3,8e5	8,81	1,13e-4 [9,73]	4,86	9,4
4	5,1e5	29,21	3,38e-4 [29,23]	14,62	0,1
5	6,4e5	34,92	4,02e-4 [34,75]	17,37	0,5

Se observa que para el caso laminar existe un 10% de diferencia porcentual en promedio y en todos los casos el cálculo de la tasa evaporativa computacional es mayor que la tasa de evaporación empírica.

En el Gráfico 3.4 se muestra la tasa evaporativa en función de la velocidad del aire para un flujo laminar. Se concluye que al aumentar la velocidad del viento aumenta también la tasa de evaporación de la poza.

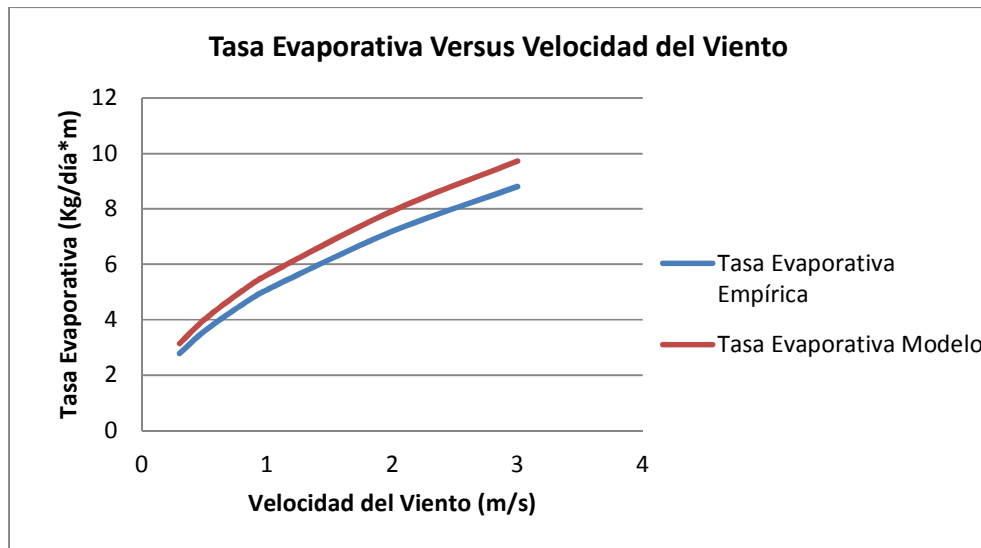


Gráfico 3.4: Comparación entre la Tasa Evaporativa Empírica y computacional en Función de la Velocidad del Viento, para el caso Laminar.

En el Gráfico 3.5 se muestra la tasa de evaporación para velocidades entre 4 (m/s) y 5 (m/s), se observa que al aumentar la velocidad del viento aumenta la tasa de evaporación. Por otro lado, la diferencia porcentual de la tasa de evaporación para las velocidades de 4 y 5 (m/s) es de un 0,5% como máximo.

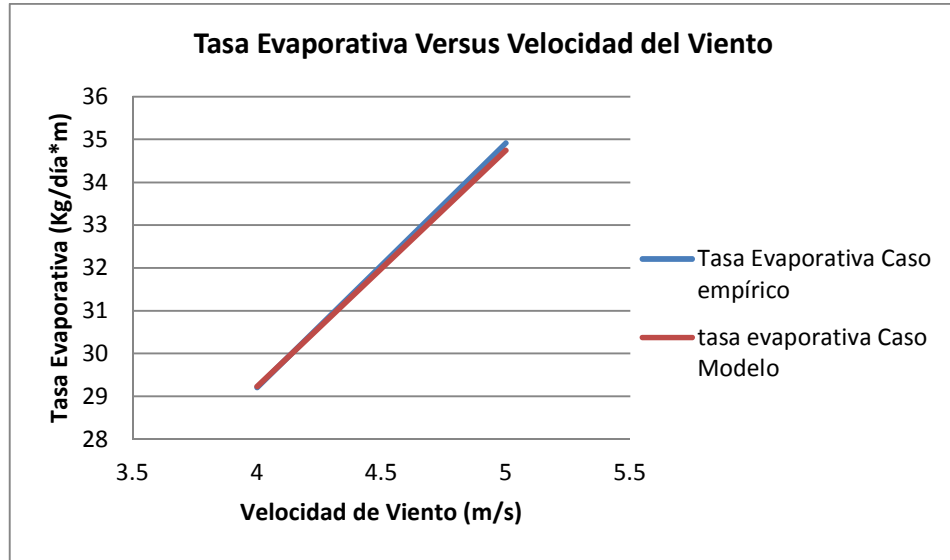


Gráfico 3.5: Comparación entre la Tasa Evaporativa Empírica y computacional en Función de la Velocidad del Viento, para el caso Completamente Turbulento

En la Figura 3.2 y en la Figura 3.3 se observa que el espesor de la capa límite de velocidad aumenta, este cambio depende de la velocidad, dado que el espesor de la capa límite aumenta al aumentar la velocidad del viento. Otro factor que influye en el aumento del espesor de la capa límite en el cambio de flujo, donde en la Figura 3.2 a) se tiene un flujo laminar, mientras que en la Figura 3.3 a) se modeló con un flujo completamente turbulento.

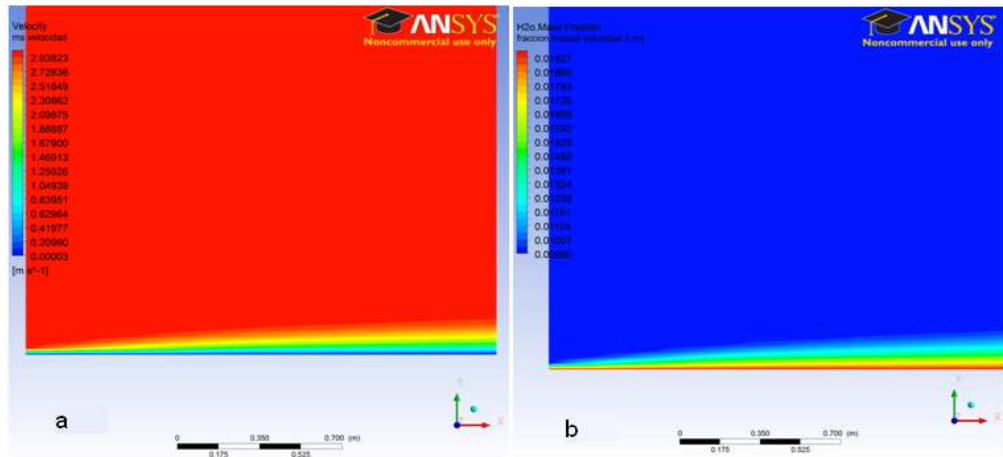


Figura 3.2: Flujo laminar, con velocidad del viento de 3(m/s). a) Capa límite de velocidad; b) Fracción másica de agua.

En la Figura 3.2 b) y en la Figura 3.3 b) se observa que la fracción másica de agua en el aire aumenta al aumentar la velocidad del aire. Esto se puede observar cualitativamente, en el tamaño de la capa límite formada sobre la superficie inferior.

En la Figura 3.3 c) se muestra la energía cinética de turbulencia que se genera sobre la superficie de la poza. Esta energía aumenta dado el aumento en el espesor de la capa límite de velocidad.

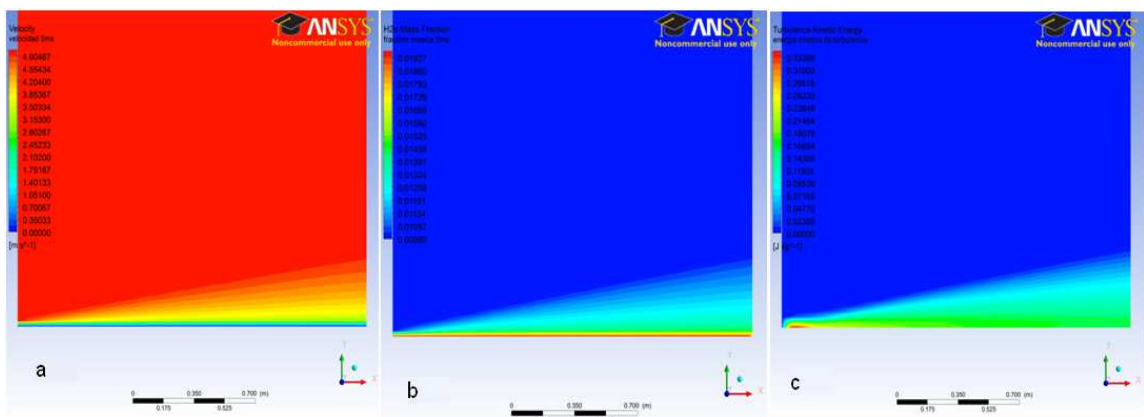


Figura 3.3: Flujo turbulento, con velocidad del viento de 5 (m/s). a) Capa límite de velocidad; b) Fracción másica de agua; c) Energía cinética de turbulencia.

3.3.2. TASA DE EVAPORACIÓN EN FUNCIÓN DE LA HR (CASO DE TURBULENCIA COMPLETA).

Este estudio se realiza para un flujo completamente turbulento sobre una Poza de 2(m) de largo, a una velocidad del viento de 5 (m/s), variando la Humedad Relativa del aire entre 10% y 90%. Los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Tasa de evaporación en función de la humedad relativa del aire, para una velocidad de entrada de 5(m/s) con flujo completamente turbulento.

TASA DE EVAPORACIÓN DE ACUERDO A HUMEDAD RELATIVA				
HR%	Tasa evaporativa total empírica $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right)$	Tasa evaporativa total Computacional $na \left(\frac{Kg}{s \cdot m} \right) [na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right)]$	Tasa evaporativa normalizada Computacional $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m^2} \right)$	e (%)
90%	6,98	7,8e-5 [6,76]	3,38	-3,2
80%	13,97	1,6e-4 [13,89]	6,94	-0,6
70%	20,95	2,4e-4 [20,67]	10,33	-1,4
60%	27,93	3,2e-4 [27,46]	13,73	-1,7
50%	34,92	4,0e-4 [34,61]	17,30	-0,9
40%	41,90	4,8e-4 [41,79]	20,89	-0,3
30%	48,88	5,6e-4 [48,61]	24,31	-0,6
20%	55,87	6,5e-4 [55,81]	27,90	-0,1
10%	62,85	7,3e-4 [63,01]	31,51	0,3

A partir de la Tabla 3.6 se observa que la tasa de evaporación y la humedad relativa son inversamente proporcionales. Además, se observa que la diferencia porcentual, e, tiene un máximo de 3,21%.

En el Gráfico 3.6 se muestra como la Tasa Evaporativa disminuye al aumentar la Humedad Relativa, lo que tiene directa relación con el menor potencial para la transferencia de masa que existe cuando hay mayor humedad relativa. Para una humedad relativa de 10% se tiene una tasa de evaporación

de $65(\text{Kg}/\text{día} \cdot \text{m})$, mientras que para una humedad relativa del aire de 90% se tiene una tasa de evaporación de $6(\text{Kg}/\text{día} \cdot \text{m})$.

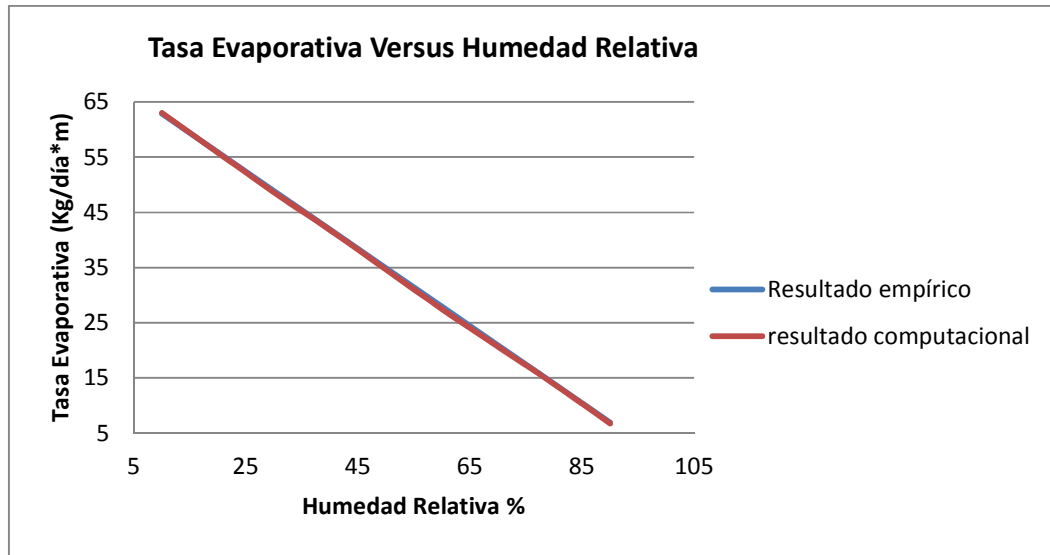


Gráfico 3.6: Comparación entre la tasa Evaporativa Empírica y Computacional en función de la Humedad Relativa.

3.3.3. TASA DE EVAPORACIÓN EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA UNA POZA DE 12 M DE LARGO Y HR=50%.

Se realiza el estudio para una poza de 12 (m) de largo. Se estudia un flujo completamente turbulento, con velocidades del viento desde 2 (m/s) hasta los 5 (m/s). En la Tabla 3.7, se muestra resultado obtenido empíricamente y el resultado obtenido computacionalmente, junto a la diferencia porcentual entre ambos.

Tabla 3.7: Tasa evaporativa total en función de la velocidad para poza de 12 [m] de largo, con HR=50%.

TASA EVAPORATIVA					
$u \left(\frac{m}{s} \right)$	Re_L	Tasa evaporativa total empírica $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right)$	Tasa evaporativa total computacional $na \left(\frac{Kg}{s \cdot m} \right) \left[na \left(\frac{Kg}{día \cdot m} \right) \right]$	Tasa evaporativa normalizada computacional $na \left(\frac{Kg}{día \cdot m^2} \right)$	e %
2	1,5e6	70,3	8,36e-4 [72,2]	6,02	2,7
3	2,3e6	97,3	1,17e-3 [100,9]	8,41	3,7
4	3,1e6	122,5	1,48e-3 [127,8]	10,65	4,3
5	3,8e6	146,4	1,78e-3 [153,6]	12,80	4,9

En la Tabla 3.8 se muestra la tasa de evaporación normalizada por el largo de la poza, para velocidades entre 3 (m/s) y 5 (m/s). Se compara la tasa de evaporación entre una poza de 12 (m) de largo y una poza de 2 (m) de largo, la comparación se realizó en $(Kg/día \cdot m^2)$.

Tabla 3.8: Comparación de la Tasa Evaporativa entre dos pozas de distinto tamaño en función del viento, con flujo completamente turbulento y HR=50%

TASA EVAPORATIVA		
Velocidad de entrada $u(m/s)$	Poza 12 (m) largo $na(Kg/día \cdot m^2)$	Poza 2 (m) largo $na(Kg/día \cdot m^2)$
3	8,41	11,64
4	10,65	14,53
5	12,80	17,30

En el Gráfico 3.7, se observa que la poza de mayor tamaño presenta menor tasa de evaporación por metro cuadrado de superficie, esto ocurre dado que al avanzar el viento por la superficie de la poza adquiere humedad, lo que por lo visto en el punto 3.3.2 disminuye la transferencia de masa, a diferencia de una poza de menor dimensión.

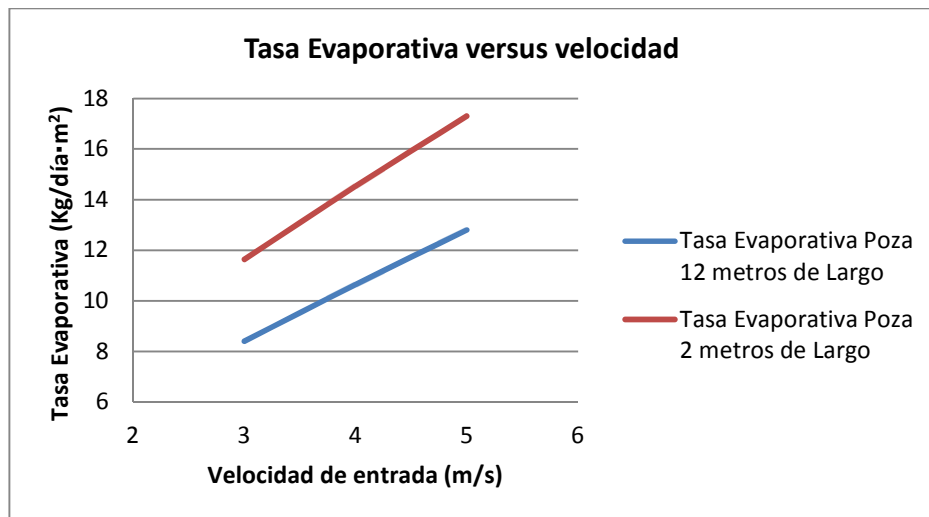


Gráfico 3.7: Comparación entre la Tasa Evaporativa y el tamaño de la poza, para diferentes velocidades del viento en la entrada de la poza, HR=50%

4 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR PARA UN MODELO BIFÁSICO.

El sistema se estudia bajo el concepto de modelo bifásico porque existen dos regiones de análisis con diferentes fluidos, estos son:

- Atmósfera: región que se encuentra sobre la poza, puede ser de aire seco o aire con Humedad Relativa mayor a 0.
- Poza: región de análisis que se encuentra en el fluido agua líquida.

Se realiza el estudio en estado transiente, dada la dependencia del tiempo que posee el problema estudiado.

Las nuevas condiciones de borde que se agregar a este problema son la temperatura del fluido en la poza, el movimiento de la fase líquida y la interacción entre las dos fases.

4.1. GEOMETRÍA.

En la Figura 4.1 se muestra la geometría utilizada para trabajar con el modelo bifásico. El sistema estudiado consta de una región de análisis superior que presenta medidas de 2,5(m) de alto y por 4(m) de largo, y una región de análisis inferior de 0,7(m) de profundidad por 2(m) de largo. Éstos representan a la atmósfera y a la poza respectivamente.

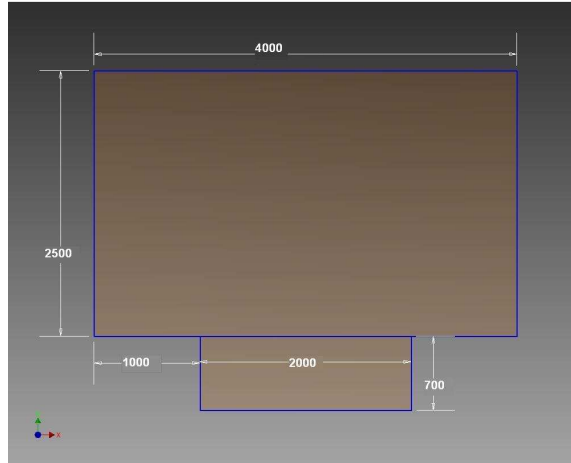


Figura 4.1: Geometría del modelo 2D.

4.2. MALLADO Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA

El programa ANSYS utiliza el método de volúmenes finitos donde el mallado seleccionado presenta elementos de superficie rectangular, que tienen una relación entre su largo y ancho como la mostrada en el Gráfico 4.1. Este gráfico da cuenta de la calidad de los elementos utilizados en la modelación, a mayor métrica de elementos significa que estos adquieren forma rectangular alargada.

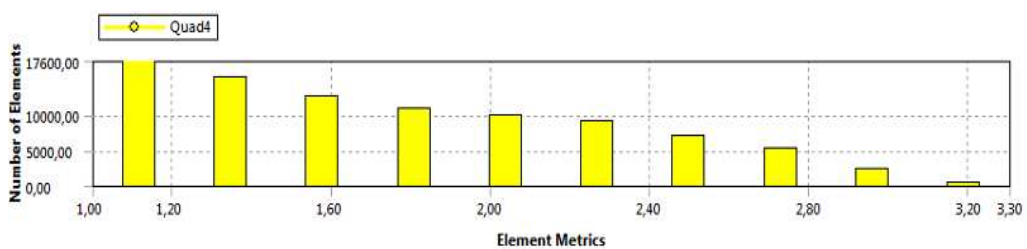


Gráfico 4.1: Relación entre alto y ancho de los elementos del sistema

Para realizar el mallado se utilizó "Bias" en los bordes verticales, para presentar en la interface entre la atmósfera y la poza elementos de menor tamaño y así mejorar los resultados. El Bias utilizado fue de 12, entre los elementos más lejanos de la interface y los que se encuentran sobre ella, no se

utilizó Bias en el eje horizontal. Los elementos de menor tamaño se encuentran en la interfaz aire- agua, y tienen 0,003 m de alto y 0,01 m de ancho.

4.3. MODELADO

4.3.1. MODELO DE EVAPORACIÓN SIN GRADIENTE SALINO CON FLUJO DE AIRE LAMINAR.

Se trabaja con un estado transiente, con gravedad $-9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$, en dirección del eje “y”. Se utiliza modelo Multifásico, Volúmenes de fluidos, se trabaja con el método implícito para calcular la fracción de volumen que sale del volumen de control.

El flujo es laminar, dada una velocidad del aire en el borde de entrada de 0,01 (m/s), una distancia recorrida entre el borde de entrada y el final de la poza de 3 (m), lo que da un Reynolds de 1910,8. Se supone una temperatura del agua de 300 (K) y una temperatura del aire 295 (K).

Se utiliza como método de solución el algoritmo PISO. El paso de tiempo seleccionado es de 0,015(s). El máximo de iteraciones por paso de tiempo es de 35. La cantidad de pasos de tiempo es de 10000.

4.3.2. SOLUCIÓN CUALITATIVA.

Como primera aproximación se busca obtener resultados cualitativos de los diferentes gradientes.

Los resultados obtenidos para los contornos de temperatura y las líneas de corriente de velocidad en función del tiempo se muestran en la Figura 4.2 y la Figura 4.3.

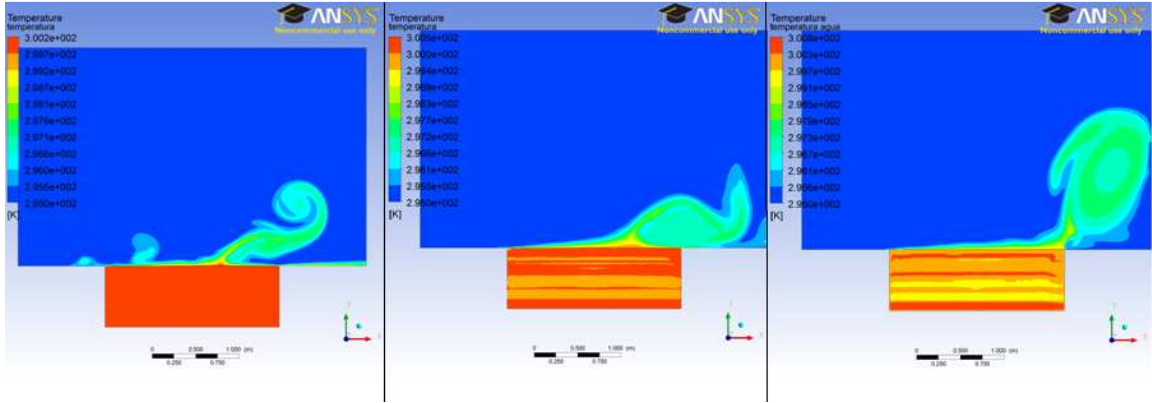


Figura 4.2: Sucesión de contorno de Temperatura (K), 132 (s), 360 (s), 980 (s)

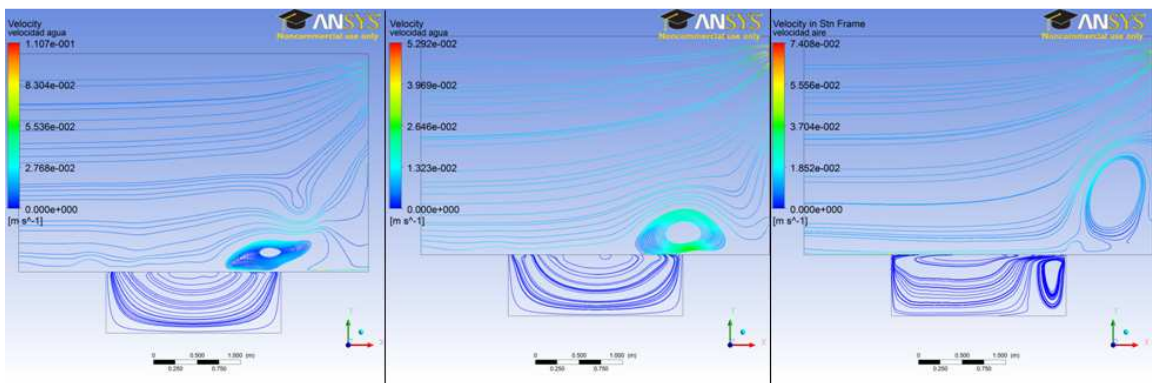


Figura 4.3: Sucesión de líneas de corriente de velocidad (m/s), 132 (s), 360 (s), 980 (s).

Para el tiempo modelado se observa que el sistema aún no ha llegado a un estado estacionario.

En esta simulación se estudia la interacción entre la fase líquida y la fase gaseosa con transferencia de calor pero sin transferencia de masa. Se observa en las Figura 4.2 la distribución de temperatura en ambas fases y en la Figura 4.3 se observa la velocidad del fluido en ambas fases.

Se puede observar que el agua se mueve por efecto del viento y a su vez que las velocidades mostradas en el contorno de velocidad del cuerpo de agua son menores que las velocidades del contorno de velocidad del viento.

5 MODELO DE EVAPORACIÓN SIN GRADIENTE SALINO, CON CONVECCIÓN NATURAL.

5.1. FÍSICA DEL PROBLEMA.

En el contexto del estudio de las pozas solares, ha sido analizado, tanto teóricamente como empíricamente el caso de aquellas pozas solares en que la velocidad inicial del aire es despreciable y por lo tanto, la transferencia de masa dependerán sólo de factores como la humedad relativa, radiación solar, diferencia de temperatura entre el agua y el aire, entre otros factores [13].

Las condiciones iniciales del problema son: fracción másica de vapor en el aire de 0,006 ($Kg_{vapor}/Kg_{aire\ húmedo}$), que corresponde a un 30% de humedad relativa, temperatura del agua a 300 (K), temperatura del aire a 295 (K), velocidad inicial del aire y del agua en la poza es nula y no se considerarán en esta simulación modelos de radiación.

5.2. CÁLCULO EMPÍRICO DE LA EVAPORACIÓN DE UNA POZA CON CONVECCIÓN NATURAL.

El cálculo empírico de la tasa de evaporación de un sistema bifásico, se realiza teniendo en cuenta las ecuaciones del Capítulo 2, desde Ec. 2.11 hasta la Ec. 2.17.

Para el caso empírico se tienen los siguientes datos:

Humedad Relativa: 30 %

Difusividad vapor en aire: $2,6e - 5$

Densidad de vapor saturado ($T_{superficial}$) = $0,0304(Kg/m^3)$

Densidad de vapor saturado ($T_{ambiente}$) = $0,02306(Kg/m^3)$

Ancho poza: 0,6 (m)

Viscosidad cinemática: $1,57e - 5(m^2/s)$

aceleración de gravedad: 9,8 (m/s²)

La densidad del aire húmedo se puede calcular a partir del ANEXO C.

Donde se obtiene:

Densidad Aire húmedo en la superficie es: 1,1621 (kg/m³)

Densidad Aire húmedo en el medio ambiente es 1,1929 (kg/m³)

Como resultado la transferencia de masa o tasa de evaporación se encuentra en el rango de: $5,25 \cdot 10^{-5} - 8,423 \cdot 10^{-5}$ (Kg/m²s).

5.3. GEOMETRÍA

La física de este problema requiere una geometría simétrica a ambos lados de la poza, donde se ha colocado un borde vertical a 500 mm de la poza a cada lado, y un borde a una altura de 1500 (mm), para que la cota superior no inflencie sobre la física de la poza.

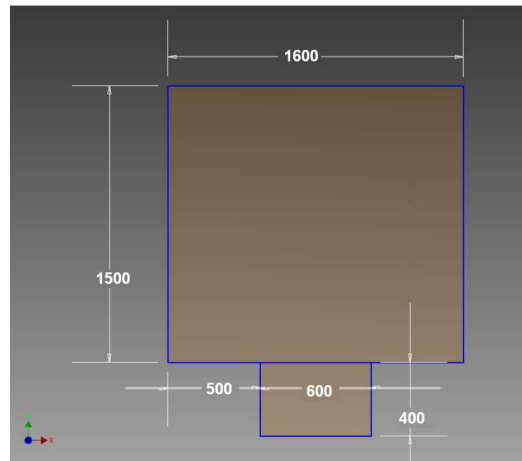


Figura 5.1: Sistema agua pura - atmósfera, estudio transferencia de masa bajo convección natural.

5.4. MALLADO Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA.

Para este caso las medidas del elemento de menor tamaño son de 3,3 x 3,3 (mm) y la cantidad total de elementos en el sistema es de 127.000 elementos.

Se utiliza un “solver” basado en la presión, se resuelve un estado transiente del sistema y la formulación de la velocidad es absoluta. El sistema posee aceleración de gravedad igual a $-9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ en el eje “Y”. Las condiciones de operación del sistema son las siguientes: Presión de operación: 101.325 (Pa); Temperatura de operación: 295 (K); Densidad de operación (densidad del aire) $1,225 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$. La tensión superficial entre el aire húmedo y el agua es una constante de 0,071 (N/m), obtenido a partir del Anexo B.

El modelo utilizado es multifásico, con volúmenes de fluidos, donde se utilizan dos fases diferentes: el agua líquida y el aire húmedo. Se activa la ecuación de energía y el tipo de flujo a modelar es laminar. Se modela la transferencia de masa mediante el mecanismo de evaporación-condensación, descrito en el Anexo E.

El algoritmo de solución del modelo es PISO, con un factor de corrección de 1. Las ecuaciones para determinar la densidad, el momento, la fracción másica, la energía, las especies de aire húmedo y agua líquida son de segundo orden. La presión se calcula con el algoritmo PRESTO!

La formulación del modelo transiente se realiza mediante: Bounded Second Order Implicit y Non-Iterative Time Advancement, para mayor información revisar el Anexo D. Se selecciona el modelo Non-Iterative Time Advancement dado que se obtuvo mejor resultado en las simulaciones.

Se utilizan diferentes pasos de tiempo dependiendo del progreso del sistema en el tiempo. Para comenzar la simulación, dado que el sistema se encuentra en un estado de reposo, el paso de tiempo utilizado es de 0,0001(s). Luego se probó aumentando el paso de tiempo por cada segundo de tiempo real, hasta llegar a un paso de tiempo de 0,002(s).

5.5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de simular 5 segundos reales. Se esperan contornos, curvas y vectores simétricos en el eje “x” con respecto al eje “y” en el sistema.

En la Figura 5.2 a) se muestran las curvas de velocidad del aire y en la Figura 5.2 b) se muestra la dirección de las curvas de velocidad a través del gráfico con los vectores. Se puede observar que la velocidad el aire presenta una forma ascendente en el centro con vórtices simétricos en la parte inferior en contacto con la poza.

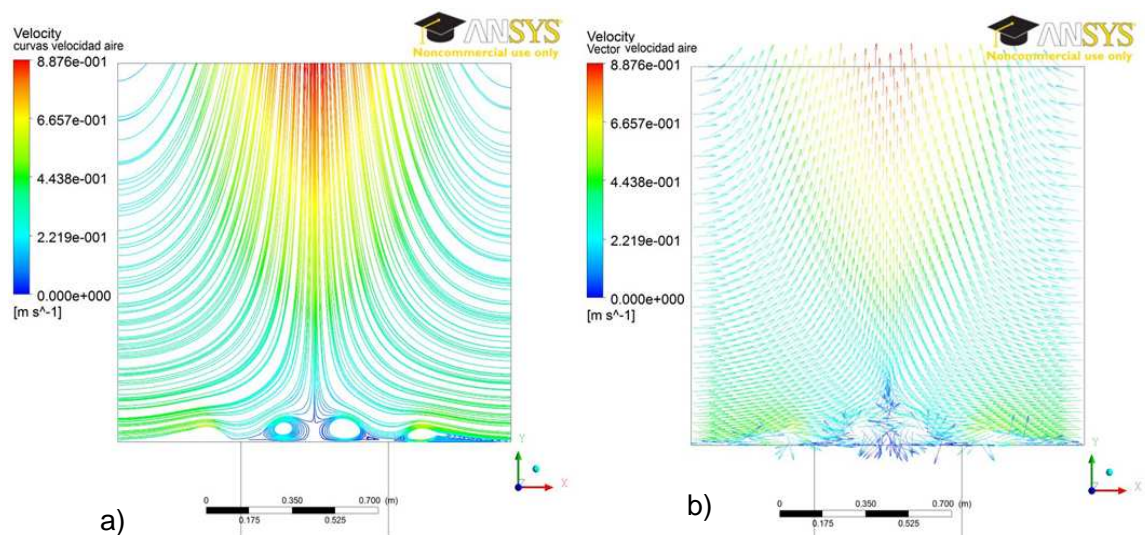


Figura 5.2: a) Curvas de velocidad del aire; b) Vectores de velocidad del aire.

En la Figura 5.3 a) se muestran las curvas de velocidad del agua en la poza solar, y en la Figura 5.3 b) se observan los vectores que dan muestra de la dirección que adopta la corriente del agua. Se aprecian circulaciones simétricas al igual que en el caso del aire.

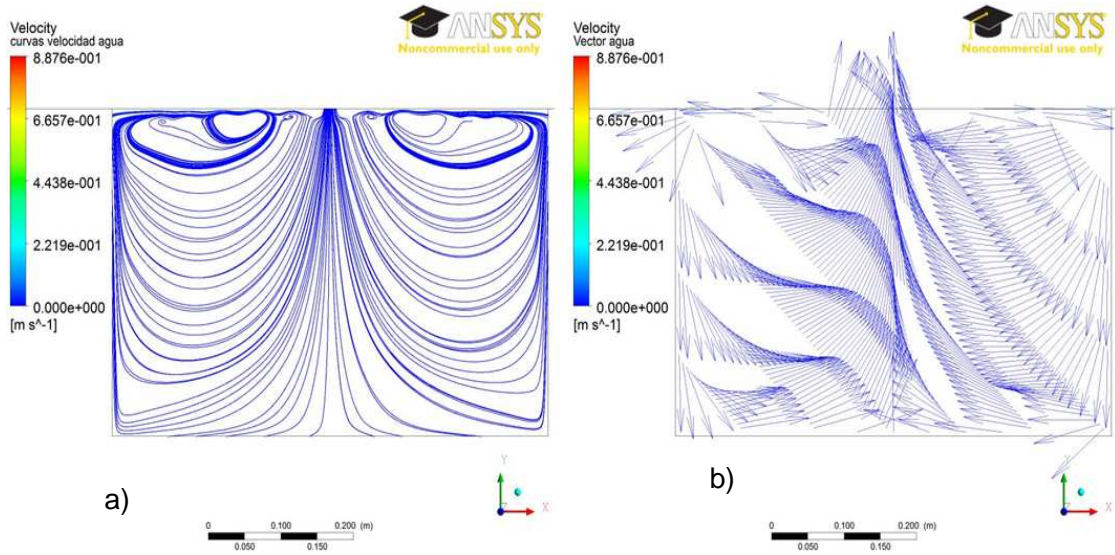


Figura 5.3: a) Curvas de velocidad del agua; b) Vectores de velocidad del agua.

En la Figura 5.4 a) se muestra el contorno de temperatura formado en la atmósfera, éste posee forma simétrica y se eleva en el centro desde la poza. Se muestra también en la Figura 5.4 b) el contorno de fracción másica de vapor en la atmósfera, donde se observa que la mayor fracción másica de vapor se encuentra inmediatamente sobre la poza y disminuye al elevarse sobre ella.

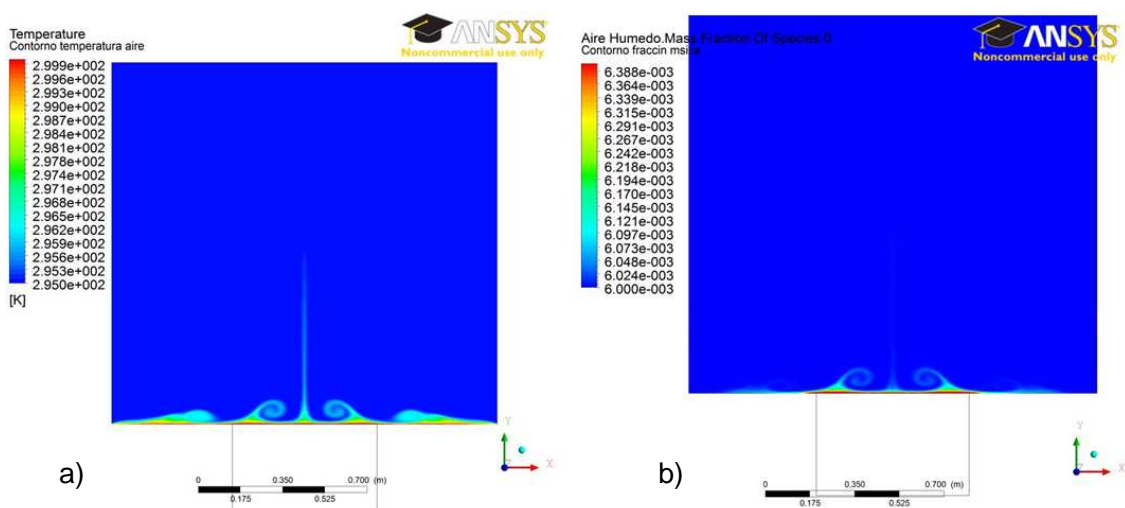


Figura 5.4: a) Contorno de temperatura del aire; b) Contorno de Fracción másica del vapor de agua en el aire.

En la Figura 5.5 se muestra el contorno de temperatura del agua en la poza solar. Se observa que la temperatura en la parte superior de la poza es menor que en el cuerpo de agua, lo que significa que existe transferencia de energía en aquel sector del sistema. Para poder observar esta disminución en la temperatura se amplió la escala tres veces en el eje "Y".

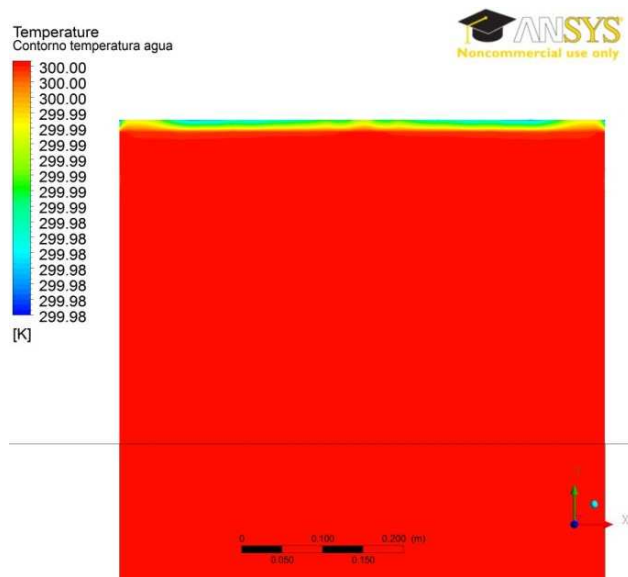


Figura 5.5: Contorno de temperatura del agua de la poza

En la Figura 5.6 se presentan los contornos y curvas de velocidad luego de simular 34 segundos en tiempo real.

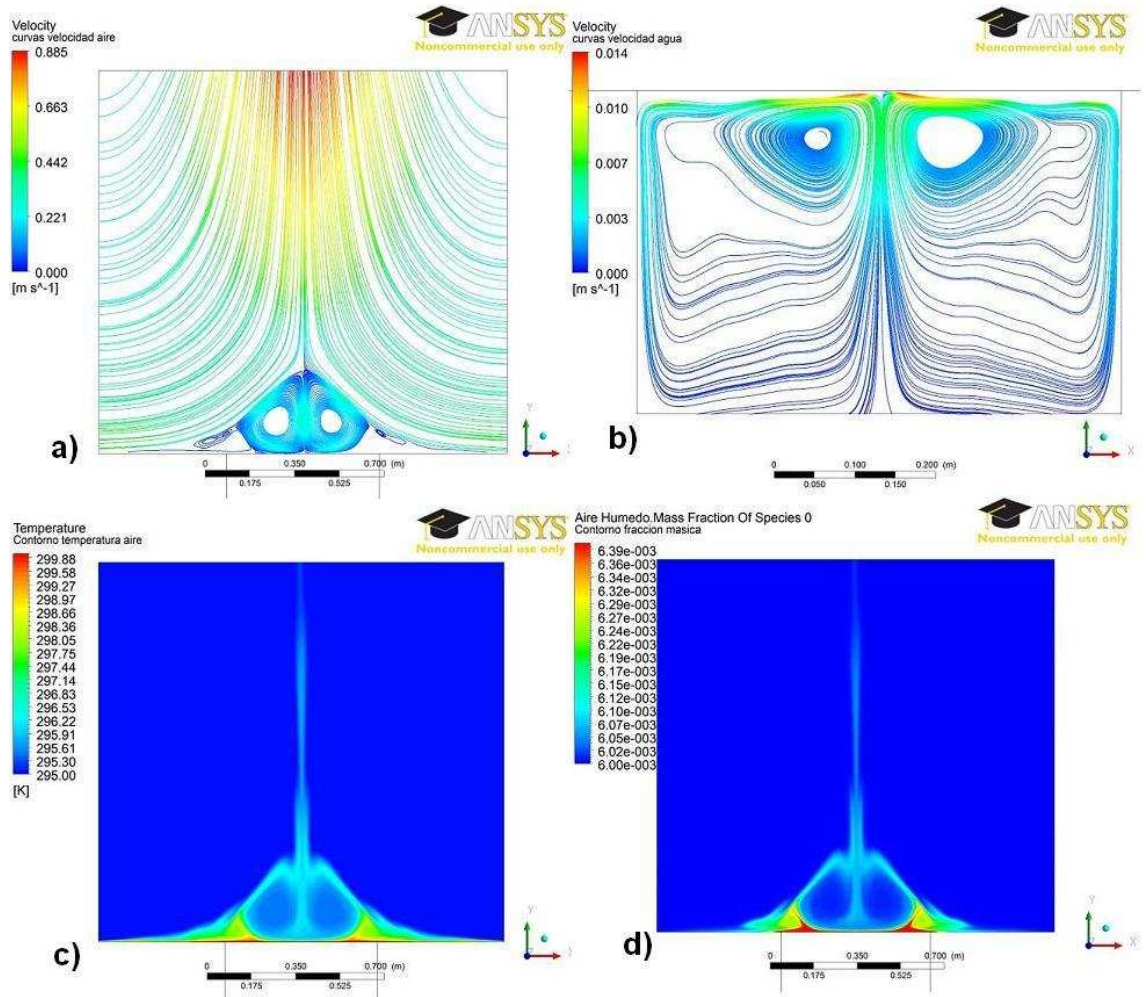


Figura 5.6: Para un tiempo real de 34 s, se muestran las siguientes figuras: a) Curva de velocidad del aire; b) Curvas de velocidad del agua; c) Contorno de temperatura del aire; d) Contorno de fracción másica del vapor de agua en el aire.

Se observa que los contornos en los 34 (s) de tiempo real mantienen su simetría y la forma adoptada durante los primeros 5 segundos. Se mantiene el hecho que el contorno de temperatura es el que determina la forma del sistema y finalmente la forma que deben adquirir el resto de los contornos, como la velocidad y la fracción másica. La tasa de evaporación instantánea obtenida los 34 (s) es de $26 \text{ (Kg/día} \cdot \text{m)}$. Este valor aún debe ser analizado en un tiempo real de simulación mayor.

6 MODELO DE EVAPORACIÓN BIFÁSICO SIN GRADIENTE SALINO CON CONVECCIÓN FORZADA, VELOCIDAD 1 (M/S).

6.1. FÍSICA DEL PROBLEMA

Es necesario estudiar el caso de convección forzada, en esta simulación se trabaja un modelo con flujo laminar, la velocidad del viento es paralela a la superficie de la poza, la fracción másica de vapor de aire es 0,006 ($Kg_{vapor}/Kg_{aire\ húmedo}$), correspondiente a 30% de Humedad Relativa. La temperatura de la poza es de 300(K) mientras que la temperatura del aire es de 295(K).

6.2. GEOMETRÍA

Para el caso de convección forzada la geometría presenta una altura de la sección de atmósfera de 700(mm) de altura, esto dado que en el estudio de tasa de evaporación caso monofásico se determinó 700 (mm) como altura óptima de modelado. En la Figura 6.1, se muestra la geometría utilizada para el modelo bifásico de convección forzada.

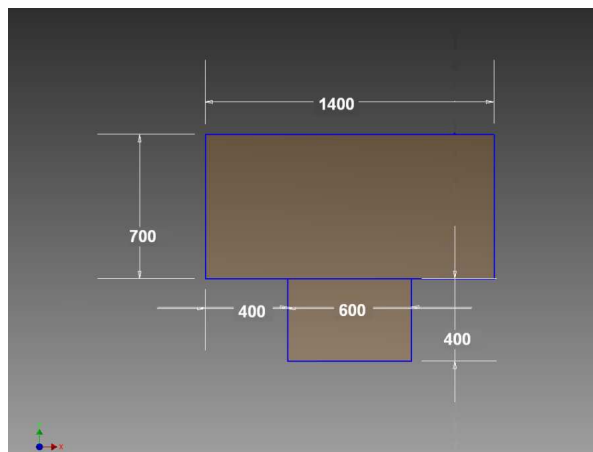


Figura 6.1: Dimensiones modelo sistema bifásico con evaporación bajo convección forzada.

6.3. MALLADO Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA

Para este caso las medidas del elemento de menor tamaño son de 2,5 x 2,5 (mm) y el número total de elementos en el sistema es de 37.600. Este modelo tiene las mismas condiciones de configuración de los métodos de solución que el modelo de flujo bifásico con convección natural, pero el paso de tiempo utilizado es 0,0001 (s).

6.4. RESULTADOS.

En la Figura 6.2 a) se observa el contorno de densidad global del sistema poza-atmósfera. En la Figura 6.2 b) se observa que los contornos de velocidad son perpendiculares al borde izquierdo de la sección de atmósfera, y el ingreso se realiza a 1 (m/s).

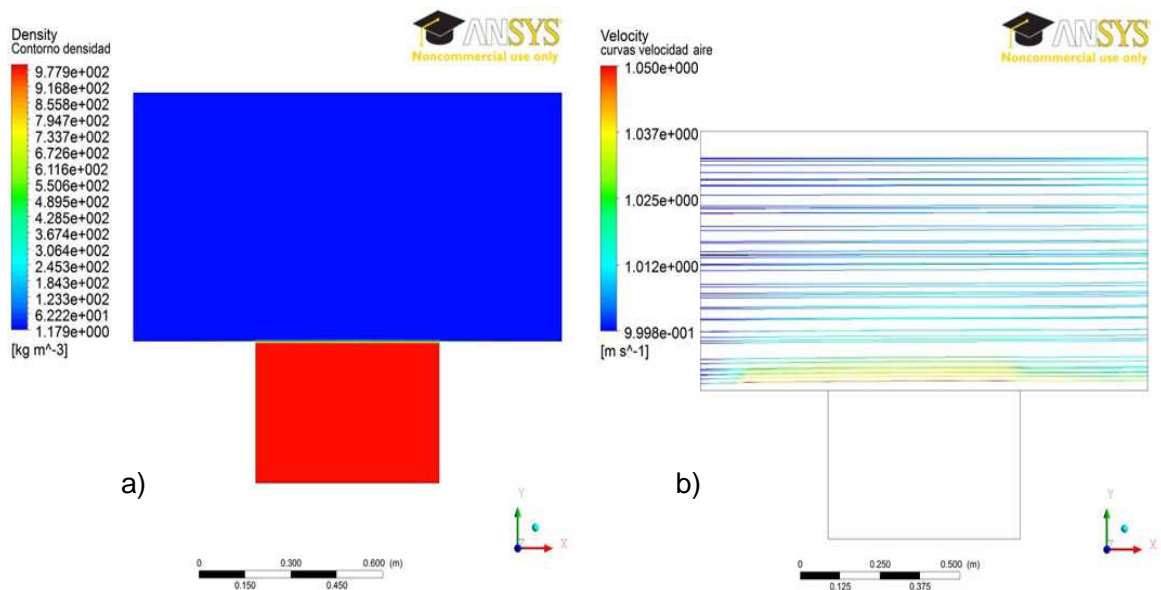


Figura 6.2: a) Contorno de densidad global del sistema; b) Curvas de velocidad del aire.

En la Figura 6.3 a) se muestran las curvas de velocidad del agua, que presentan una circulación en toda la poza, donde el sector superior de la poza presenta el color dado para la velocidad mayor, que corresponde a 0,009(m/s). Se muestran también en la Figura 6.3 b) los vectores que representan la dirección de la corriente en la poza, donde los vectores en la superficie poseen la misma dirección del viento.

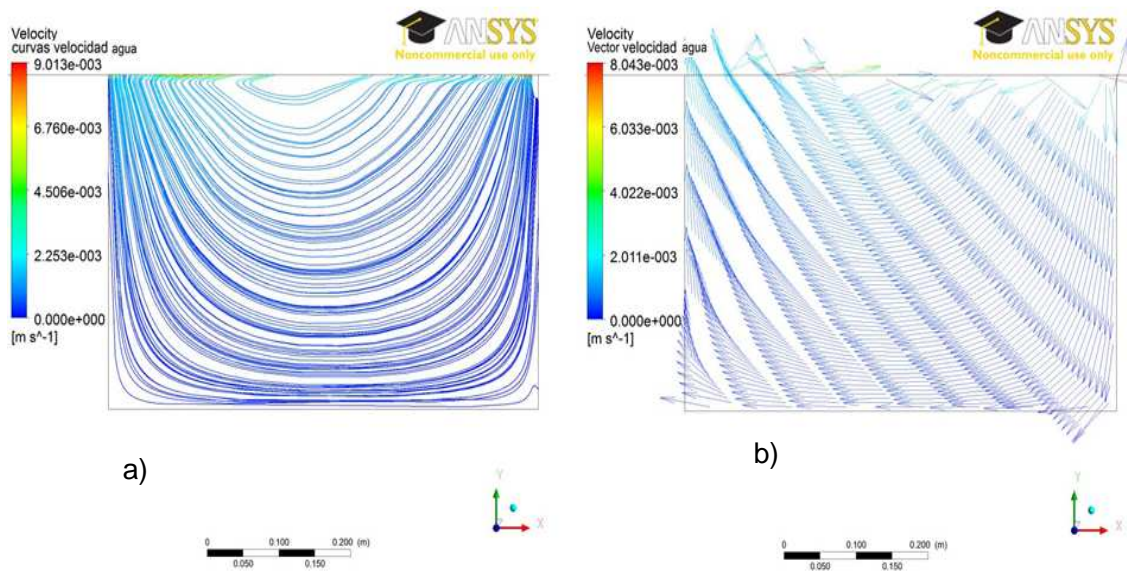


Figura 6.3: a) Curvas de velocidad del agua; b) Vectores de velocidad del agua.

En la Figura 6.4 a) se muestran los contornos de velocidad para el agua de la poza, donde se observa que a medida que se acerca al fondo de la poza los contornos de isovelocidad abarcan mayor superficie, por lo tanto, las velocidades son más estables, y a medida que se acerca a la superficie la cantidad de contornos de isovelocidad aumenta, lo que significa que en la superficie se genera un mayor gradiente de velocidad.

En la Figura 6.4 b) se muestran los contornos de velocidad para el agua, pero en otro estilo de gráfico, con la finalidad de observar el cambio de velocidad en la poza.

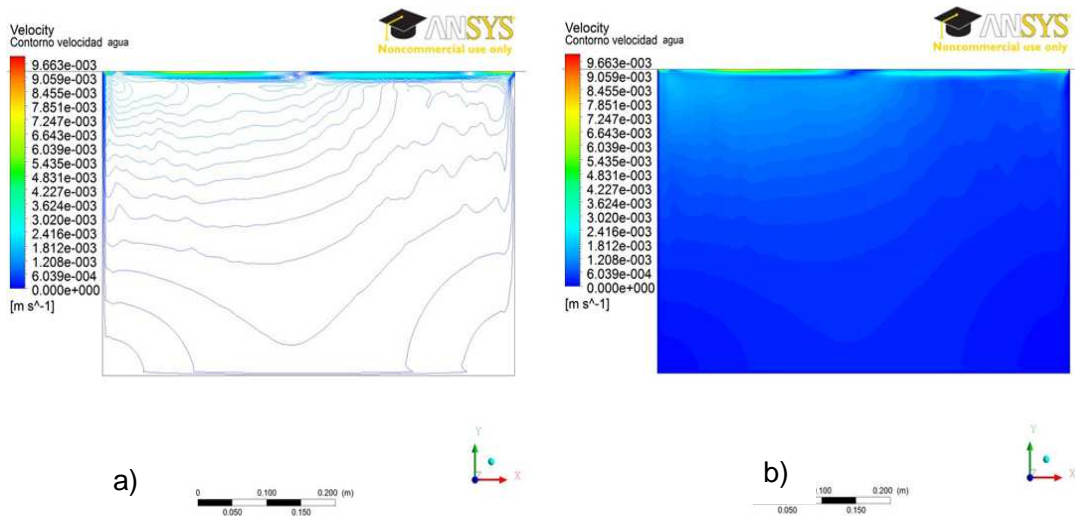


Figura 6.4. a) y b) Contornos de velocidad del agua

En la Figura 6.5 a) se muestra el contorno de velocidad del aire en la atmósfera, donde se observa claramente la forma de la capa límite con velocidades cercanas a 0 (m/s) inmediatamente sobre en suelo y la superficie de la poza.

En la Figura 6.5 b) se muestra la fracción másica de vapor en la atmósfera. Se observa como el vapor sale directamente de la poza y se traslada de la misma forma que la capa límite formada por el viento.

A ambos contornos de la Figura 6.5 se les ha aplicado tres veces un aumento de la escala en el eje "Y".

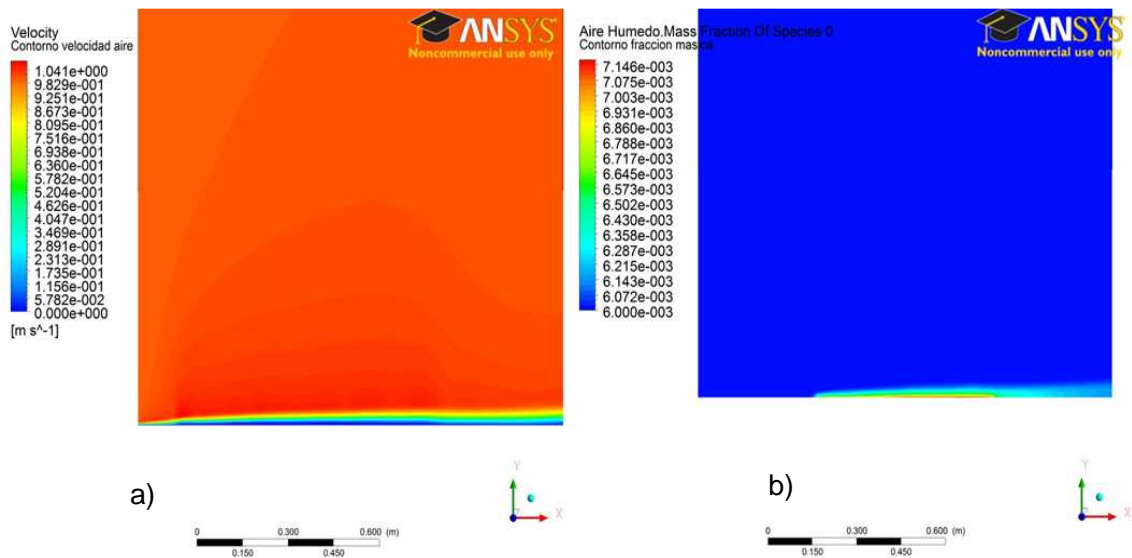


Figura 6.5: a) Contorno de velocidad del aire; b) Contorno de fracción másica de vapor en el aire húmedo.

En la Figura 6.6 se muestra el contorno de temperatura del agua de la poza. Tal como se esperaba, el sector superior de la poza posee menor temperatura, lo que significa que efectivamente en la superficie existe traspaso energético desde el agua hacia el aire. Para visualizar este contorno se ha realizado una ampliación en el eje “Y” de tres veces.

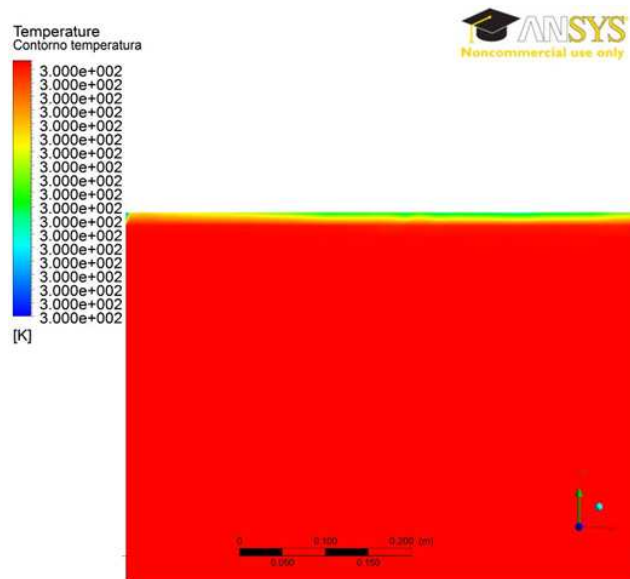


Figura 6.6: Contorno de temperatura en el agua, amplificado 3 veces en el “eje y” (vertical).

En las siguientes figuras se presentan los contornos y curvas de velocidad luego de simular 93 segundos en tiempo real.

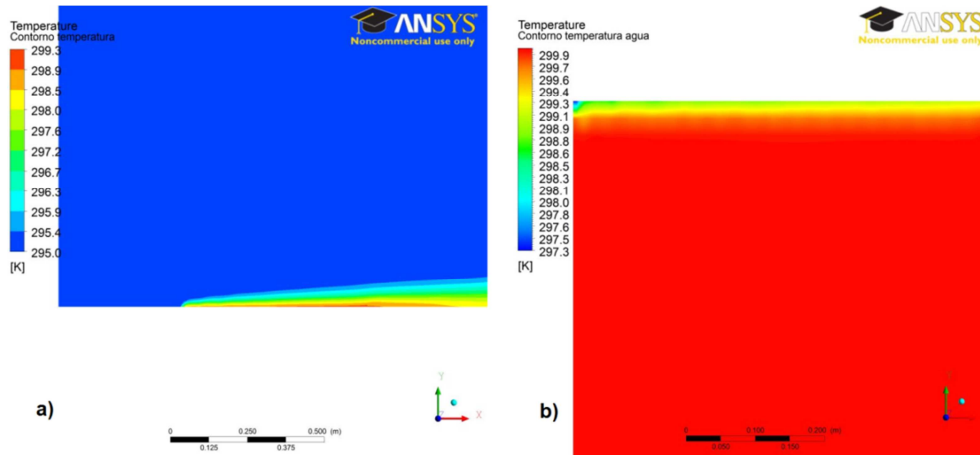


Figura 6.7: Para un tiempo real de 93 (s), se muestran los siguientes contornos de temperatura ambos amplificados 5 veces en el “eje y” (vertical): a) Contorno de temperatura en la atmósfera; b) Contorno de temperatura en la poza

En la Figura 6.7 a) se muestra el contorno de temperatura en el aire, donde se observa una pluma flectada. En la Figura 6.7 b) se muestra el contorno de temperatura en el agua, donde se ve que la temperatura en la superficie en contacto con la atmósfera presenta una disminución de la temperatura en aproximadamente 3 (°C).

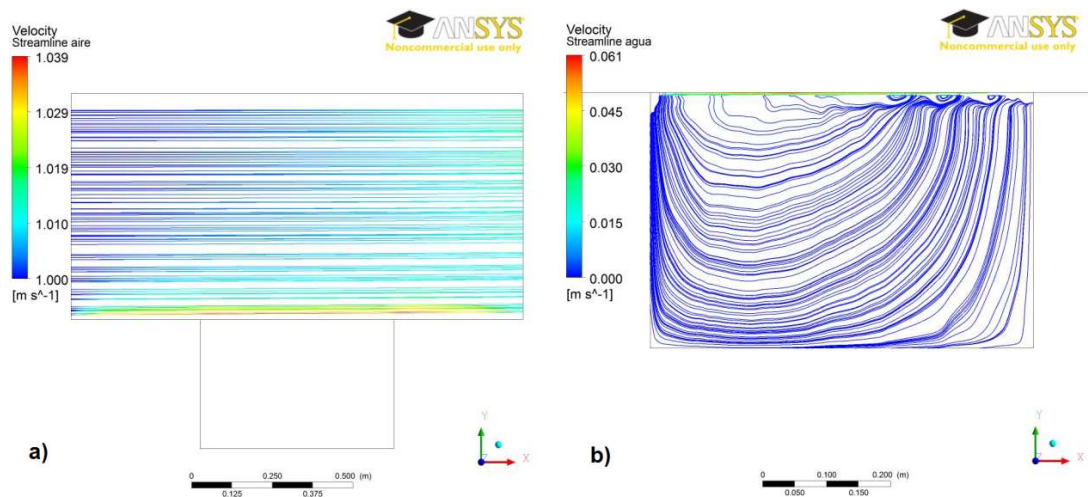


Figura 6.8: Para un tiempo real de 93 s, se muestran las siguientes líneas de velocidad: a) Líneas de velocidad del aire; b) Líneas de velocidad del agua.

En la Figura 6.8 se muestran las líneas de velocidad del aire y del agua, a) y b) respectivamente. Estas líneas de velocidad se mantienen su forma a través del tiempo simulado (Observar Figura 6.2 b) y Figura 6.3 a)).

En la Figura 6.9 se muestra el contorno de velocidad del aire, que tal como se espera muestra una capa límite que en el sector en contacto con la superficie es mínima.

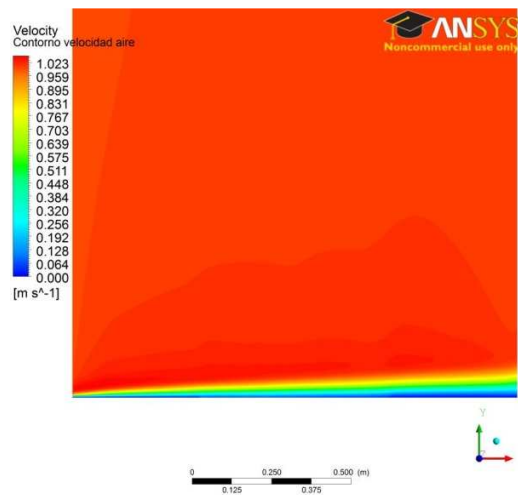


Figura 6.9: Contorno de velocidad del aire amplificado en 5 veces en el "eje y".

Para el tiempo de 93 (s) la tasa de evaporación instantánea es de 0,8 ($Kg/día \cdot m$). Este valor aún debe ser analizado en un tiempo real de simulación mayor.

6.5. AJUSTE DE GEOMETRÍA DEL MODELO.

Para realizar las comparaciones pertinentes entre el presente modelo y el modelo de gradiente doblemente difusivo, se genera un modelo con una poza de 3(m) de largo y 2,2(m) de profundidad. Donde los datos del sistema son: Velocidad del viento 1(m/s); Humedad Relativa 30%; Temperatura del aire 283(K); Temperatura del agua 288(K).

Con la necesidad de aumentar el tiempo real de iteración del problema propuesto se realizó un cambio en las variables del criterio de convergencia absoluta, aumentando el residuo de las ecuaciones de 0,001 a 0,01 en la mayoría de los casos, excepto en el caso de la velocidad del “eje y” y de la ecuación de energía. La cantidad de elementos en el sistema es de 19.000 y el tamaño del elemento menor es de 0,01x0,02 (m) de alto y largo correspondientemente.

Para un tiempo real de simulación de 37 (min) se tiene el Gráfico 6.1, donde luego de 1.000 (s) de simulación en tiempo real se observa una tendencia estable.

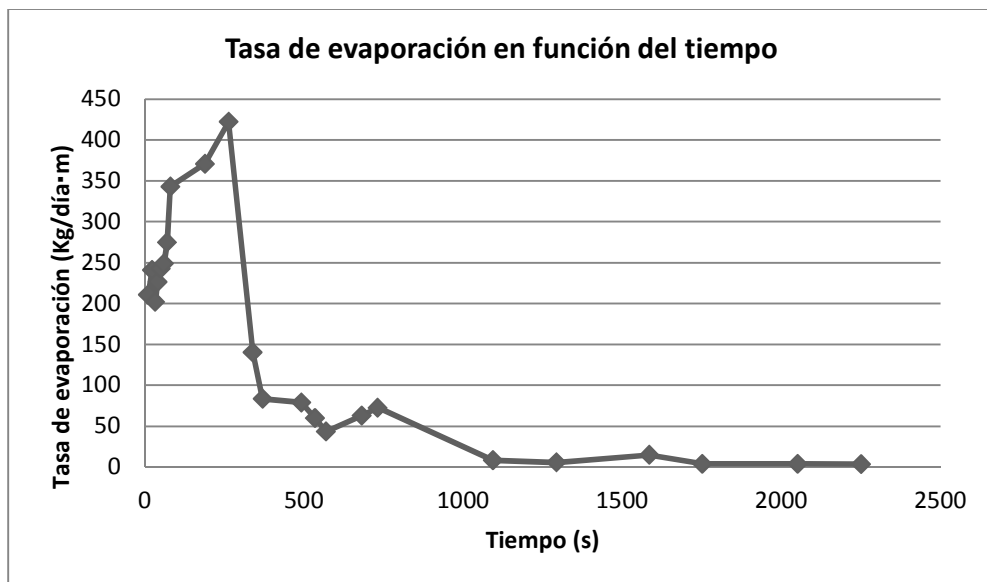


Gráfico 6.1: Tasa de evaporación en función del tiempo

En el Gráfico 6.2, se muestra la tasa de evaporación del modelo en el período entre los 500(s) y los 2250(s) con la finalidad de estudiar la estabilidad de la tasa de evaporación. En base a los datos obtenidos es posible afirmar que la tasa de evaporación es cercana a los 4(Kg/día·m), dado que esta estabilidad se ha mantenido durante 400 (s).

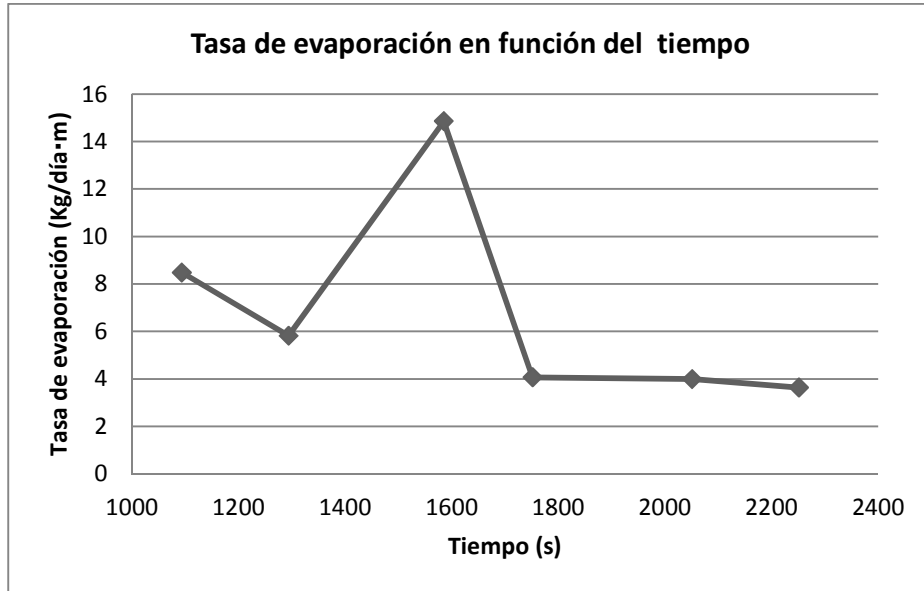


Gráfico 6.2: Tasa de evaporación en función del tiempo entre los 500(s) y los 2250(s).

En la Figura 6.10 se muestran las líneas de velocidad del agua en la poza para dos instantes de tiempo diferente. En la Figura 6.10 a) se muestran las líneas de velocidad del agua para los 390 (s) donde se observan vórtices en diferentes posiciones del cuerpo de agua, mientras que en la Figura 6.10 b) se observa un vórtice de mayor tamaño cercano al fondo de la poza. Ambas figuras a) y b) en conjunto muestran la estabilidad que adquiere el movimiento de la poza en el tiempo.

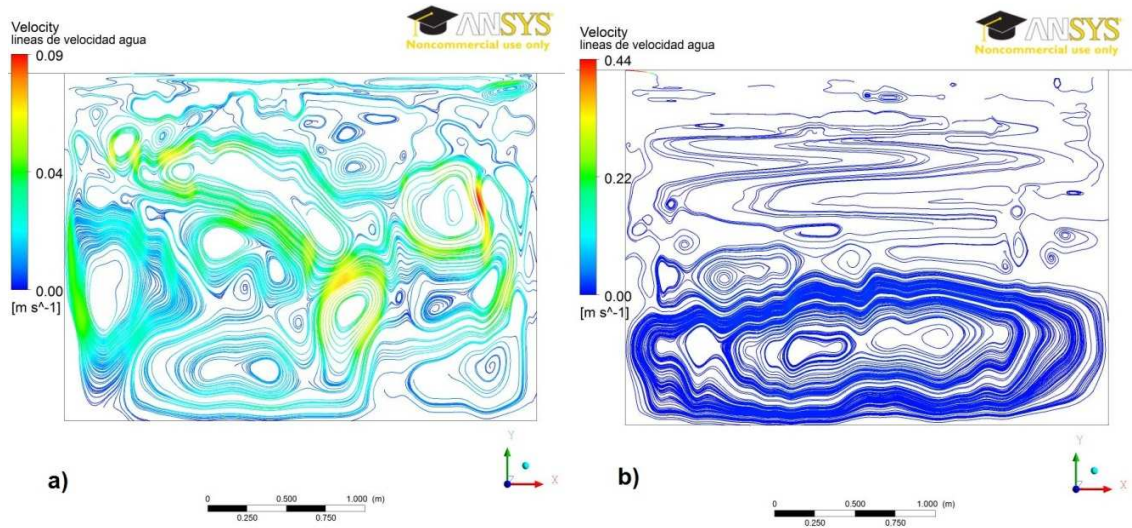


Figura 6.10: Líneas de velocidad del agua en la poza: a) 390 (s) b) 2251 (s).

Teniendo en cuenta el resultado anterior se realiza una nueva simulación con la finalidad de variar la velocidad del viento y observar el comportamiento de la tasa evaporativa. Se mantienen todos los parámetros anteriormente descritos excepto la velocidad del viento que disminuye a 0,5 (m/s).

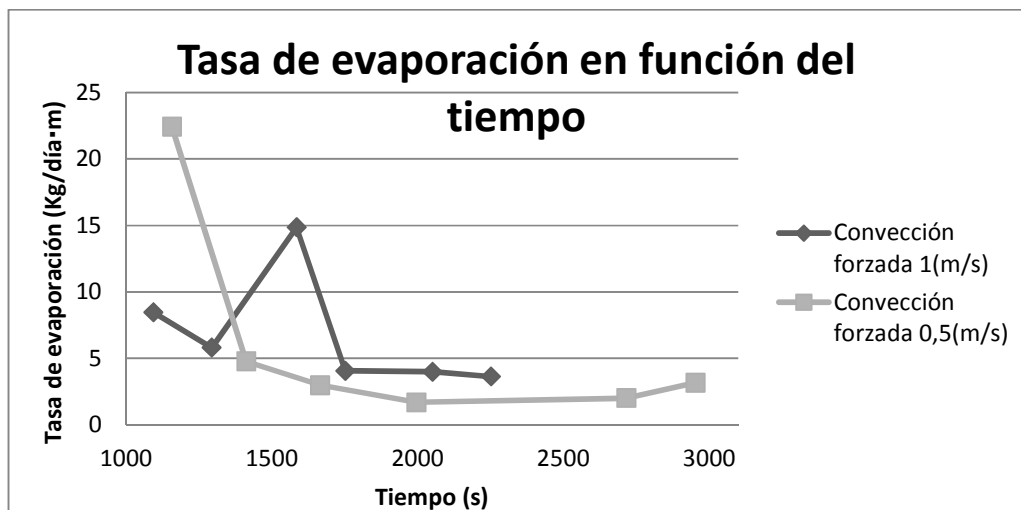


Gráfico 6.3: Tasa de evaporación en función del tiempo para velocidad del viento igual a 1(m/s) y 0,5 (m/s)

Promediando la tasa de evaporación en el caso de convección forzada con velocidad del viento de 0,5 (m/s) entre los 1600(s) y los 3000(s) de simulación en tiempo real, se obtiene que la tasa de evaporación promedio en ese período de tiempo es de $2,5(Kg/día \cdot m)$.

A partir de este resultado se observa nuevamente la tendencia esperada en que al aumentar la velocidad del viento aumenta la tasa de evaporación en la poza.

La tasa de evaporación para el sistema anterior con las condiciones físicas de 30% de humedad relativa, temperatura del agua de 288 (K), temperatura del aire de 283(K) y velocidad del viento de 0,5 (m/s) es de $6,7(Kg/día \cdot m)$ mediante los cálculos empíricos realizados por Brutsaert. Lo que significa que la tasa de evaporación calculada computacionalmente es 2,7 veces menor que la tasa de evaporación empírica.

7 MODELO DE TASA DE EVAPORACIÓN BIFÁSICO CON GRADIENTE SALINO CON CONVECCIÓN FORZADA, VELOCIDAD DEL AIRE ES 0,15 (M/S).

7.1. FÍSICA DEL PROBLEMA

Es necesario estudiar el caso de convección forzada, en esta simulación se trabaja un modelo con flujo laminar, la velocidad del viento es paralela a la superficie de la poza, la fracción másica de vapor de agua en el aire es 0,006 ($Kg_{vapor}/Kg_{aire\ húmedo}$). Se inicializa el modelo teniendo en cuenta el gradiente de Salinidad y Temperatura que posee una Poza Solar. La Salinidad en términos de fracción másica va desde los 0,06 ($Kg_{NaCl}/Kg_{salmuera}$) en la superficie hasta los 0,25 ($Kg_{NaCl}/Kg_{salmuera}$) en el fondo de la Poza Solar.

La temperatura de la poza es una constante a 288(K), mientras que la superficie del fondo se mantiene a 313(K) en forma constante y la temperatura ambiente del aire es de 283(K). Dado que las pozas solares son sistemas naturales, las paredes laterales perderán cierta cantidad de energía entregada por la diferencia de calor entre la poza y la tierra. En este caso como la temperatura de la poza inicialmente es de 283(K) y se puede suponer que la temperatura de la tierra es de 280,15(K), se puede suponer una pérdida cercana a $1(W/m^2)$ [9].

Los datos utilizados para crear el nuevo material, teniendo en cuenta que este fue ingresado como si fuera un fluido, fueron los mostrados en la Tabla 7.1:

Tabla 7.1 : Propiedades de la salmuera

Propiedades de la salmuera		
Densidad	ANEXO F	Kg/m^3
Calor Específico	ANEXO F	J/KgK
Viscosidad Dinámica	ANEXO F	Kg/ms
Difusividad	$(0,58 + 0,03T + 0,0002T^2 + 0,001S^2)10^{-9}$	m^2/s Ecuación (2.21)

7.2. GEOMETRÍA

Para el caso de un flujo doblemente difusivo con convección forzada la geometría se selecciona recreando una Poza Solar experimental, con una altura de la sección de atmósfera de 700 (mm), resultado obtenido en el estudio de tasa de evaporación caso monofásico determinada como altura óptima de modelado. En la Figura 7.1 se muestra la geometría utilizada para el modelo estudiado.

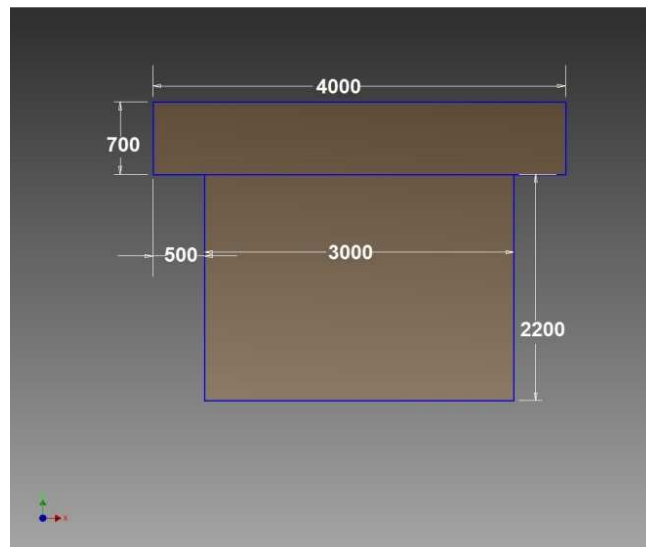


Figura 7.1: Dimensiones modelo sistema bifásico con evaporación bajo convección forzada.

7.3. MALLADO, INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA.

La inicialización del sistema se obtiene en base a datos empíricos [9], en la Tabla 7.2 se presenta la fracción másica por cada rango de profundidad utilizados en el modelo computacional.

Tabla 7.2: inicialización de Poza Salina en Fracción Másica.

Rango de Profundidad (m)	Fracción másica ($Kg_{NaCl}/Kg_{salmuera}$)
0-0,5	0,06
0,5-0,76	0,09
0,76-1,02	0,12
1,02-1,28	0,16
1,28-1,54	0,19
1,54-1,8	0,22
1,8-2,2	0,25

En la Figura 7.2 se muestra la aproximación inicial utilizada para el gradiente Salino en $Kg_{NaCl}/Kg_{Salmuera}$ y en la Figura 7.3 se muestra el gradiente de densidad de la poza solar.

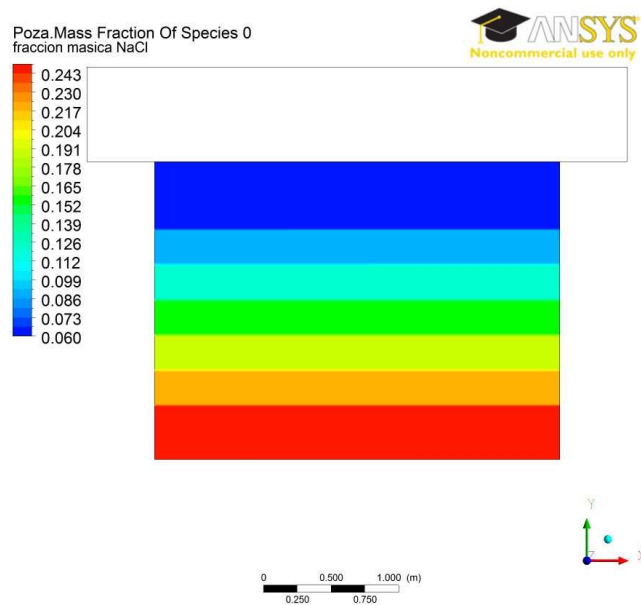


Figura 7.2: Inicialización de gradiente Salino ($Kg_{NaCl}/Kg_{salmuera}$)

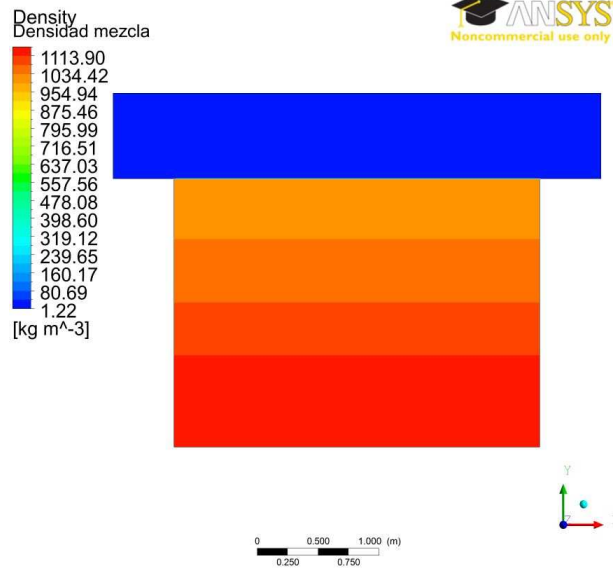


Figura 7.3: Inicialización de Densidad de la Mezcla(Kg/m^3)

Se realiza un estudio de mallado para obtener la independencia de malla en 5 casos con diferente. Para elementos de 5x5 (cm), 3x3 (cm), 2x2 (cm), 1,2x1,2 (cm) y 1x1 (cm). Los resultados son los mostrados en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Número de Elementos versus tasa de evaporación.

Tamaño del elemento ($cm \cdot cm$)	Número de Elementos	Tasa de evaporación na ($Kg/día \cdot m$)
5x5	3760	161,6
3x3	10616	12,9
2x2	23500	10,0
1,2x1,2	65706	7,6
1x1	94000	6,7

En el Gráfico 7.1 se observa cómo la Tasa de evaporación converge hacia una cantidad cercana a 6 (Kg/día), luego de 6 (s) en tiempo real.

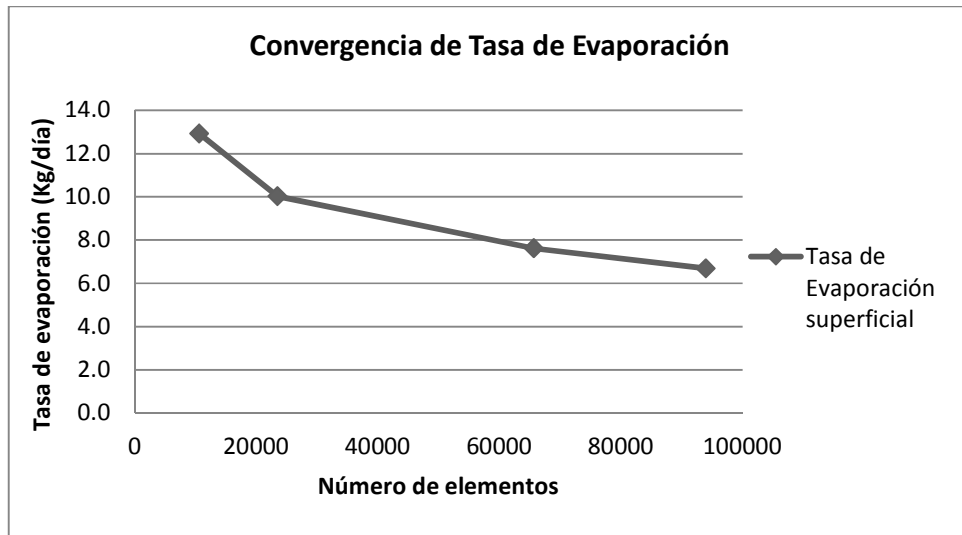


Gráfico 7.1: Análisis de la independencia de malla

7.4. RESULTADOS.

Se observa que luego de 6 (s) de tiempo real modelado, el sistema de la poza solar comienza a generar movimientos convectivos en el fondo de la poza así como en la superficie. Por otro lado la temperatura en la superficie del fondo comienza a transferir calor a la salmuera en la poza.

El valor teórico calculado para la tasa de evaporación para una poza de 3 metros de largo y con temperaturas ambiente de 283(K) y temperatura de superficie de la poza de 288 (K) se encuentra en el rango: $6,06 \cdot 10^{-5}/1,22 \cdot 10^{-4} (Kg/ms)$.

El valor encontrado para la tasa de evaporación es de $7,748 \cdot 10^{-5} (Kg/s)$, cantidad menor a la calculada para una poza sin gradiente salino.

En la Figura 7.4 se muestra el movimiento convectivo de la salmuera en la Poza Solar con elementos de 5x5 (cm), en a) se presentan los contornos de velocidad, que dan cuenta de un movimiento convectivo en la superficie superior, pero además existe movimiento en el fondo de la poza. En b) se muestran las líneas de velocidad de la salmuera.

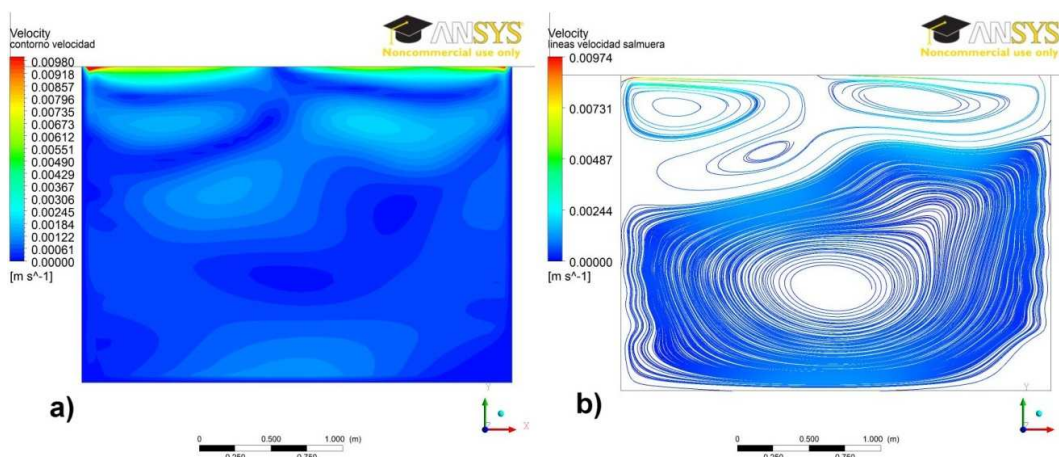


Figura 7.4:a) Contorno de velocidad de la salmuera; b) Líneas de velocidad de la salmuera.

En la Figura 7.5 a) se muestra el Contorno de Temperatura en la salmuera, donde la temperatura aumenta hacia la superficie superior; Figura 7.5 b) se muestran las líneas de velocidad del aire, en un flujo paralelo a la poza solar, con una velocidad en la entrada de 0,15 (m/s).

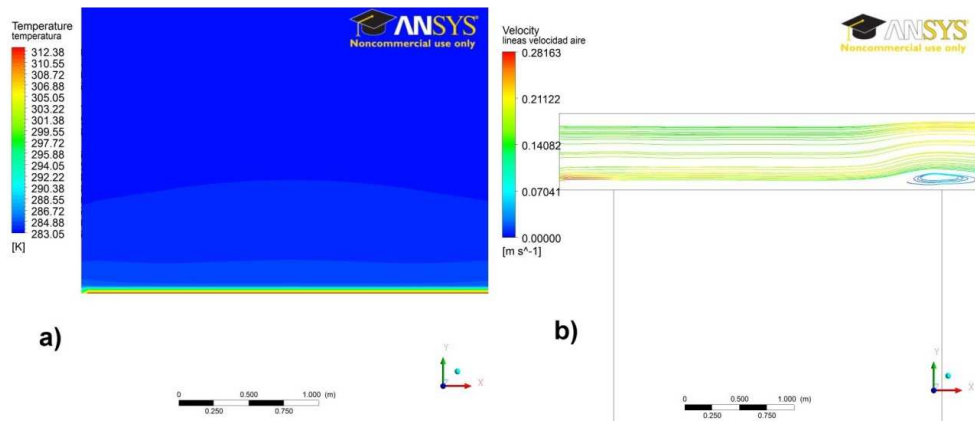


Figura 7.5: a) Contorno de la Temperatura en la salmuera; b) Líneas de velocidad del aire.

En la Figura 7.6 se presenta el gradiente salino en la poza solar, que va desde 0,06 ($Kg_{NaCl}/Kg_{Salmuera}$) en la superficie y en el fondo se presentan 0,249($Kg_{NaCl}/Kg_{Salmuera}$).

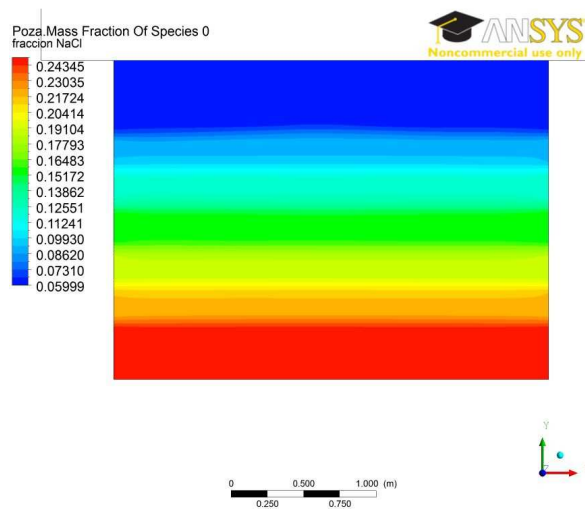


Figura 7.6: Contorno de fracción másica de Cloruro de Sodio en la poza solar.

Con la necesidad de aumentar el tiempo real de iteración del problema propuesto se realizó un cambio en las variables del criterio de convergencia absoluta, aumentando el residuo de las ecuaciones de 0,001 a 0,01 en la mayoría de los casos, excepto en el caso de la velocidad del “eje y” y de la ecuación de energía. Se varió además la velocidad del viento a 0,5(m/s).

Los resultados obtenidos para la tasa de evaporación en función del tiempo para el caso propuesto son los mostrados en el Gráfico 7.2.

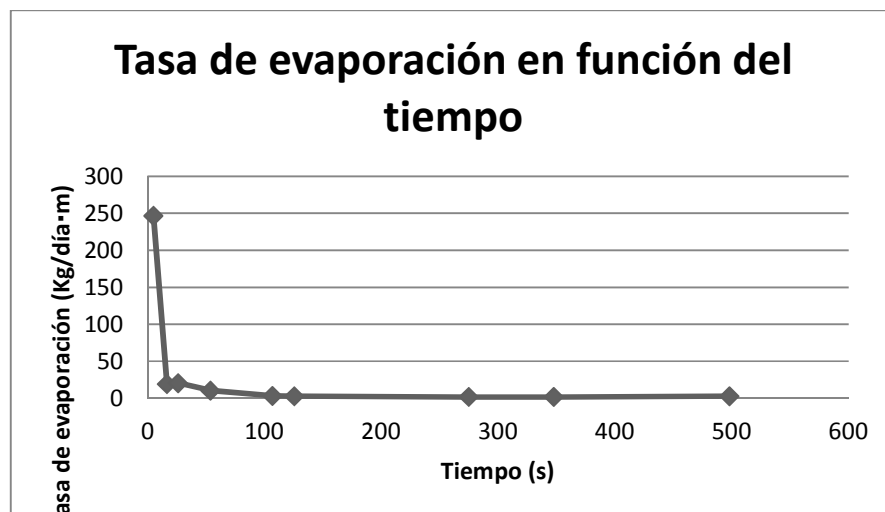


Gráfico 7.2: Tasa de evaporación en función del tiempo para una poza solar doblemente difusiva.

En el Gráfico 7.3 se muestra la tasa de evaporación entre los 50(s) y los 500(s) donde la función mostrada se vuelve estable en el tiempo. Según los datos obtenidos de la simulación la tasa evaporativa tiende a estabilizarse en torno a $2(Kg/día \cdot m)$.

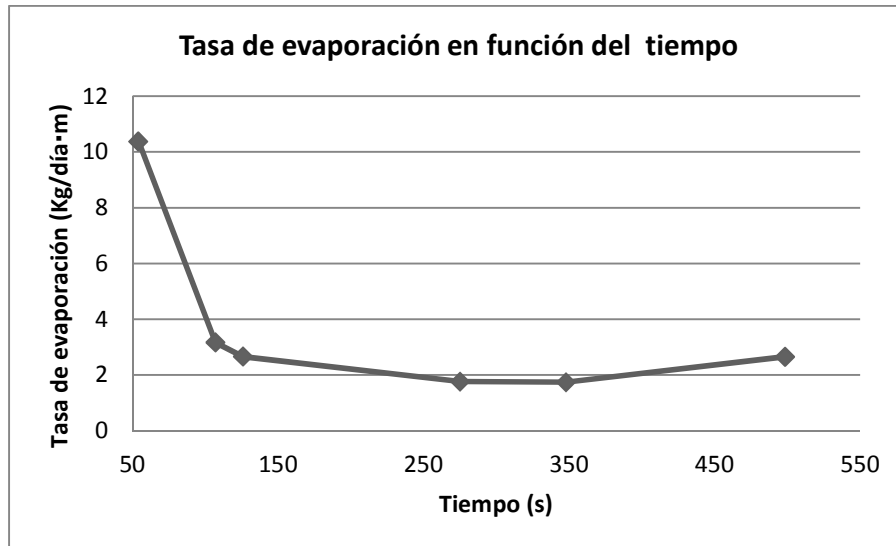


Gráfico 7.3: Tasa de evaporación en función del tiempo entre 50(s) y 500(s).

8 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.

8.1. CONCLUSIONES

El presente informe muestra una metodología que se basa en un análisis progresivo del sistema a analizar. Inicialmente se realiza un estudio bibliográfico sobre evaporación en cuerpos de agua y un estudio profundo de los sistemas de pozas solares. Acto seguido se divide el problema en tres modelos diferentes que se realizan en forma sucesiva dado que cada estudio presenta un avance en la complejidad del problema hasta lograr el modelo de una poza solar. El software utilizado para desarrollar los modelos fue ANSYS FLUENT.

8.1.1. MODELOS RESUELTOS

Primer modelo.

Se estudia la transferencia de masa de un sistema monofásico e isotérmico, donde la superficie del fluido agua es considerada una superficie sólida en que la humedad relativa se mantiene constante al 100% y el estado del sistema en función del tiempo es permanente, lo que significa que no depende del tiempo. Para este estudio se realizó un análisis para diferentes variables que cambian el comportamiento de la tasa evaporativa mediante Ansys sólo en el dominio gaseoso.

En este primer análisis se permite la analogía entre transferencia de calor y masa para predecir la tasa de evaporación, considerando tipos de flujo laminar y turbulento con velocidad del viento paralela a la superficie de la poza. Los resultados del modelo se obtuvieron después de un cuidadoso análisis del mallado y de las dimensiones de la región de análisis.

Segundo modelo.

Se simula un sistema bifásico compuesto de aire y un cuerpo de agua. El modelo analiza la transferencia de calor y transferencia de masa en estado transiente, lo que significa que el tiempo es una variable a considerar. Ambos medios, aire y agua se encuentran a temperaturas iniciales diferentes y existe movimiento en ambas fases, ya sea dado por convección natural o convección forzada (la velocidad del viento es paralela a la superficie de la poza y tiene una magnitud de 1 (m/s)).

Se eligen mallados apropiados tanto para convección natural como forzada para pozas de 0,6(m) y se estudia la tasa de evaporación. Con la finalidad de realizar una comparación entre el presente modelo y el modelo con gradiente doblemente difusivo, se aumenta el largo de la poza a 3(m) y una profundidad de 2,2(m), dadas las dimensiones de una poza solar, estudiando la tasa de evaporación en el tiempo, hasta que esta sea estable.

Se realizan dos arreglos al aumentar las dimensiones de la geometría: primero se aumenta el tamaño de la poza dado que si bien el modelo representa de forma correcta un sistema bifásico de aire y agua, la geometría no es comparable con un sistema bifásico de aire y salmuera o poza solar. Segundo, con la finalidad de aumentar el tiempo de simulación se debe reducir la restricción de los criterios de convergencia del modelo, y por otro lado, se aumenta el tamaño de los elementos.

Tercer modelo.

Se simula un sistema bifásico formado por aire y salmuera. Este modelo representa una extensión del segundo análisis realizado, lo que implica agregar un fenómeno de transferencia de masa en la fase líquida. Se realiza análisis de transferencia de calor y masa y se supone una fuente de calor radiativo en el fondo de la poza solar. Se inicializa la simulación con un gradiente en la fracción másica de la salmuera, tal como es posible realizarlo en forma experimental. Se analiza el caso de convección forzada con una velocidad de 0,15 (m/s) para realizar el estudio de malla. En este caso, al igual que el anterior, se estudia en estado transiente.

Se realiza un cambio en los criterios de convergencia, al igual que el segundo modelo, dado que el paso de tiempo para cumplir la convergencia con las restricciones iniciales era cercano a los 10^{-3} (s), por lo que el tiempo computacional de simulación era demasiado. Y la velocidad del viento en el nuevo modelo es de 0,5 (m/s).

8.1.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS

Primer modelo.

A partir del primer estudio se obtiene que la tasa de evaporación aumenta al aumentar la velocidad del aire y al disminuir la humedad relativa del aire. Al aumentar la superficie del cuerpo de agua, es posible concluir que en términos de evaporación por metro la tasa evaporativa disminuye al aumentar el tamaño de la poza. Estos resultados fueron obtenidos tanto computacionalmente como teóricamente.

Las tasas evaporativas del primer modelo se encuentran entre 3 ($Kg/día \cdot m$) y 10 ($Kg/día \cdot m$), para régimen laminar variando la velocidad del viento entre 0,3 (m/s) y 3 (m/s). Variando la velocidad del viento entre 4 (m/s) y 5 (m/s) la tasa de evaporación asciende a 29 ($Kg/día \cdot m$) y 35 ($Kg/día \cdot m$) para régimen turbulento con una diferencia porcentual entre los resultados computacional y empírico entre 0,1% y 11%.

Por otro lado la tasa evaporativa para una velocidad del viento de 5 (m/s) al variar la Humedad relativa entre el 10% y el 90% se encuentra entre 31,51 ($Kg/día \cdot m$) y 3,38 ($Kg/día \cdot m$) respectivamente, y posee una diferencia porcentual entre la tasa de evaporación empírica y la tasa de evaporación computacional entre 3,2% y 0,1% respectivamente.

La tasa de evaporación por m^2 es mayor en la poza de largo de 2(m) que en la poza de largo de 12(m).

Segundo modelo.

Las formulaciones que corresponden a cada caso, ya sea convección natural o convección forzada provienen de formulaciones a partir de datos empíricos, por lo que sólo es posible obtener un rango en el que se encontrará la tasa de evaporación en determinado caso.

Se obtuvo los campos de velocidad y temperatura esperados en las fases líquida y gaseosa, tanto para el caso de convección forzada como el caso de convección natural, con tasas de evaporación instantáneas obtenidas en los primeros segundos de simulación, las que son: $26(Kg/día \cdot m)$ para convección natural luego de 34 (s) de simulación en tiempo real y $0,8(Kg/día \cdot m)$ para convección forzada luego de 93 (s) de simulación en tiempo real. Estos resultados son dados para pozas de 0,6 (m) de largo, dado los resultados en necesario simular para tiempos mayores, el problema en estos modelos es el paso de tiempo de magnitud $10^{-4}(s)$, lo que genera una gran inversión de tiempo computacional para sacar el sistema de su estado estacionario inicial.

Para el nuevo modelo se obtiene la tasa de evaporación para velocidades del viento de 0,5(m/s) y 1(m/s) que corresponden a $2,5(Kg/día \cdot m)$ y $4(Kg/día \cdot m)$ respectivamente. Lo que mantiene las tendencias obtenidas en el primer caso, al aumentar la velocidad del viento implica que aumenta la tasa de evaporación del cuerpo de agua.

Tercer modelo.

Se modela la evaporación para la poza solar con gradiente doblemente difusivo, donde se espera que el resultado de la tasa de evaporación sea menor que la evaporación de un cuerpo de agua. Dado que los resultados suponen la simulación de la evaporación en una poza solar, se entiende que un buen resultado es la obtención tanto de una tasa evaporativa dentro del rango esperado, así como la obtención de los movimientos convectivos, los contornos de temperatura y la mantención del gradiente de salinidad esperados para una poza solar. En este caso se obtienen movimientos convectivos en la parte superior e inferior de la poza solar, y a su vez se mantiene el gradiente salino propuesto en la inicialización del modelo que va desde $0,06(Kg_{NaCl}/Kg_{salmuera})$

en el sector superior a 0,25 ($\text{Kg}_{\text{NaCl}}/\text{Kg}_{\text{salmuera}}$) en el sector inferior de la poza solar.

La tasa de evaporación resultante para la velocidad del viento de 0,5(m/s) luego de estabilizarse en el tiempo, como se muestra en el Gráfico 7.3, es de 2 ($\text{Kg}/\text{día} \cdot \text{m}$).

8.1.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS TRES MODELOS

Frente a las mismas condiciones físicas se han desarrollado tres simulaciones, una para cada modelo. Las propiedades físicas fueron: temperatura del aire 283(K), temperatura del agua 288(K), humedad relativa del aire 30%, velocidad del viento 0,5(m/s), largo de la poza 3(m).

Los resultados obtenidos para cada modelo fueron los mostrados en la Tabla 8.1:

Tabla 8.1: Comparación de la tasa de evaporación obtenida para los tres modelos estudiados bajo las mismas condiciones físicas y la misma geometría.

Tipo de modelo	Tasa de evaporación total computacional para velocidad del viento de 0,5(m/s) (Kg/día · m)	Tasa de evaporación Normalizada computacional para velocidad del viento de 0,5(m/s) (Kg/día · m²)
Modelo monofásico	3,22	1,07
Modelo bifásico aire-agua	2,5	0,83
Modelo bifásico aire-salmuera	2	0,67

Se observa que el primer modelo (monofásico) presenta la mayor tasa de evaporación.

Los resultados obtenidos indican una reducción de la tasa de evaporación para la poza solar (tercer modelo) respecto al caso de agua pura (segundo

modelo). Esto es concordante con el hecho que la presión de vapor de soluciones acuosas salinas es menor que la del agua a la misma temperatura.

Nota: El caso de modelo monofásico mostrado en la Tabla 8.1 se realizó especialmente para realizar la comparación entre los modelos.

8.2. COMENTARIOS

El avance en los modelos de simulación presenta una aproximación progresiva hacia el problema planteado. A medida que se presenta un nuevo modelo el resultado es cada vez más certero en términos de la física que gobierna el problema a estudiar.

Los diferentes modelos han quedado implementados. Y logran representar de manera realista el acoplamiento entre los campos de flujo de las fases gaseosa y líquida, así como logran resolver el sistema de transferencia simultánea de transferencia de momento, calor y masa en dos fases.

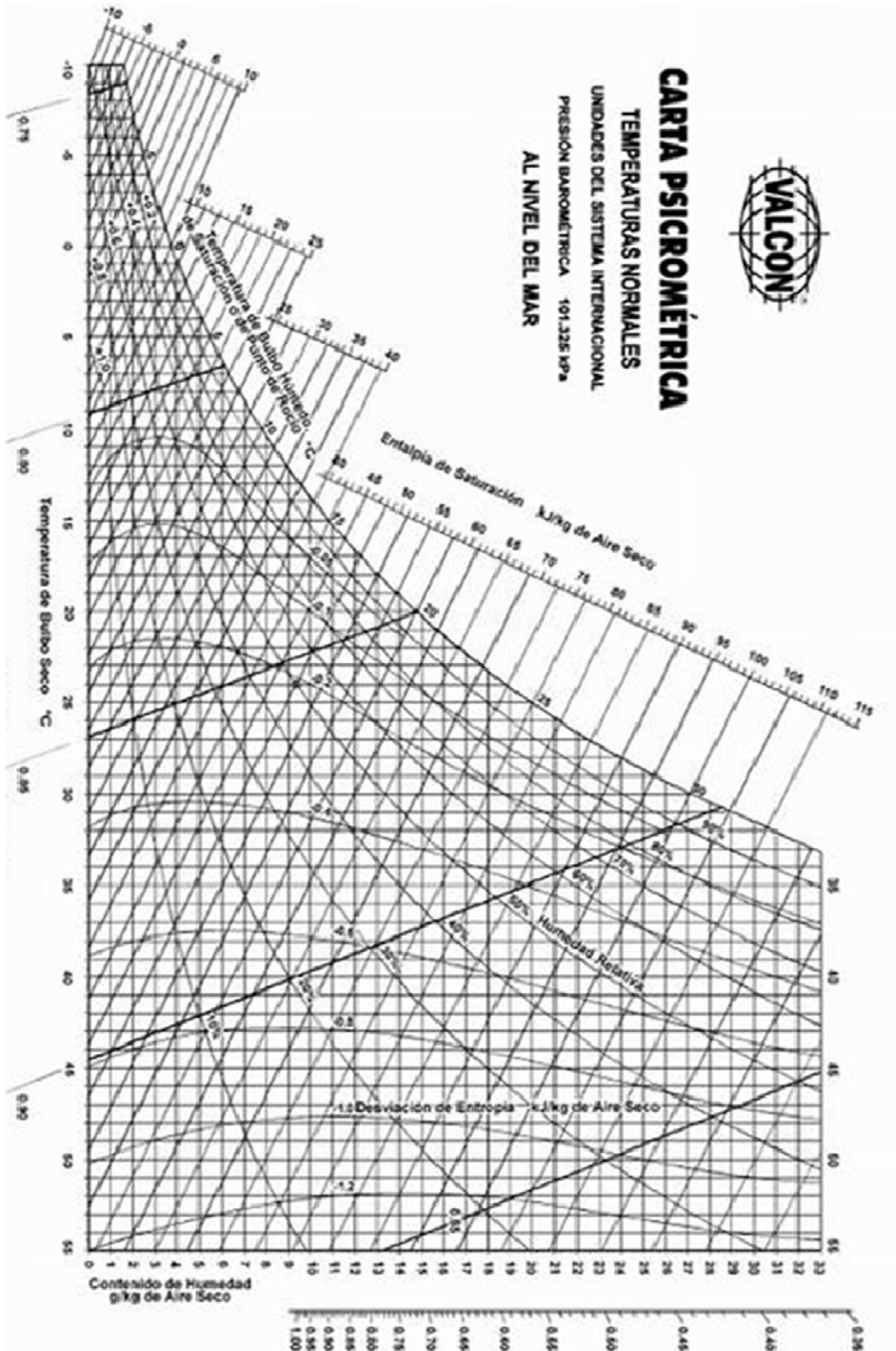
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Velmurugan V., Srithar K., "Prospects and scopes of solar pond: A detailed review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, no. 8, pp. 2253-2263, 2008.
- [2] Aliakbar Akbarzadeh, Peter Johnson, Randeep Singh, "Examining potential benefits of combining a chimney with a salinity solar pond production of power in salt affected areas," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1345-1359, 2009.
- [3] M. M. Ould Dah, M. Ouni, A. Guizani, A. Belghith, "The influence of the heat extraction mode on the performance and stability of a mini solar pond," *Applied Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3005-3010, 2010.
- [4] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Cuarta ed., México: Pearson, 1999.
- [5] S. M. Bower, J. R. Saylor, "A study of Sherwood-Rayleigh relation for water undergoing natural convection-driven evaporation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 13, pp. 3055-3063, 2009.
- [6] A. Picard, R. S. Davis, M. Cläser, K. Fujii, "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)," *IOP Publishing*, pp. 149-155, 2007.
- [7] B. G. V. M. José Miguel Moina, "Efecto de la estratificación del agua en la estimación de la evaporación en embalses de riego," *Ingeniería del agua*, vol. 16, no. 2, pp. 115-127, 2009.
- [8] F. Zangrado, "On the Hydrodynamics of salt-gradient solar ponds," *Solar Energy*, vol. 46, no. 6, pp. 323-341, 1991.
- [9] Ridha Ben Mansour, Cong Tam Nguyen, Nicolas Galanis, "Transient heat and mass transfer and long-term stability of a salt-gradient solar pond," *Mechanics research communications*, vol. 33, no. 2, pp. 233-249, 2005.
- [10] Choubani Karim, Zitouni Slim, Charfi Kais, Safi Mohamed Jomâa, Aliakbar Akbarzade, "Experimental study of the salt gradient solar pond stability," *Solar Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 24-31, 2010.
- [11] M. Al-Shammiri, "Evaporation rate as a function of water salinity,"

Desalination, vol. 150, no. 2, pp. 189-203, 2002.

- [12] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method, Estados Unidos: Longman Scientific and technical, 1995.
- [13] E. Eric Adams, Douglas J. Cosler, Karl R. Helfrich, "Evaporation from heated water bodies: Predicting combined forced plus free convection," *Water resources research*, pp. 425-435, 1990.
- [14] Manual teórico, ANSYS, ANSYS FLUENT, Theory guide, 2010.
- [15] Don W. Green, Robert H. Perry, "Perry's Chemical Engineers Handbook", Estados Unidos: McGraw-Hill, 2007.
- [16] E. W. Washburn, International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology, Estados Unidos: Mc Graw-Hill Book Company, Inc., 1927.
- [17] Manual usuario, ANSYS, ANSYS FLUENT User's guide, 2010.

A. ANEXO: CARTA PSICROMÉTRICA.



B. ANEXO: TABLA DE TENSIÓN SUPERFICIAL VERSUS TEMPERATURA.

Tensión superficial del agua a diferentes temperaturas

Temp. °C	Tensión superficial *10 ⁻² N/m
0	7.62
5	7.54
10	7.48
15	7.41
20	7.36
25	7.26
30	7.18
35	7.10
40	7.01
45	6.92
50	6.82
55	6.74
60	6.68
65	6.58
70	6.50
75	6.40
80	6.30
85	6.20
90	6.12
95	6.02
100	5.94

C. ANEXO: CÁLCULO DENSIDAD DEL AIRE HÚMEDO.

Para obtener la densidad del aire húmedo, ρ_a , se utiliza el artículo [6]

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad \text{Ecuación (C.1)}$$

$R = 8.314472(Jmol^{-1}K^{-1})$, constante de los gases.

T: temperatura aire (K)

p: Presión (Pa)

Z: factor de compresibilidad

x_v : fracción molar del vapor de agua.

$M_a = 28,96546 \cdot 10^{-3}(Kg \cdot mol^{-1})$, masa molar del aire seco

$M_v = 18,01528 \cdot 10^{-3}(Kg \cdot mol^{-1})$, masa molar del agua

$$1 - \frac{M_v}{M_a} = 0.3780 \quad \text{Ecuación (C.2)}$$

Fracción
molar vapor
de agua

$$x_v = h \cdot f(p, t) \cdot \frac{p_{sv}(t)}{p} \quad \text{Ecuación (C.3)}$$

Presión de
saturación de
vapor a T(K)

$$p_{sv} = 1(Pa) \cdot e^{AT^2+BT+C+D/T} \quad \text{Ecuación (C.4)}$$

t: temperatura °C.

h: humedad relativa entre 0 y 1.

A, B, C, D: Constantes.

$$A = 1,2378847 \cdot 10^{-5}K^{-2}$$

$$C = 33,93711047$$

$$B = -1,9121316 \cdot 10^{-2}K^{-1}$$

$$D = -6,3431645 \cdot 10^3K$$

$$f(p, t) = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad \text{Ecuación (C.5)}$$

α, β, γ : Constantes.

$$\alpha = 1,00062 \quad \beta = 3,14 \cdot 10^{-8} Pa^{-1} \quad \gamma = 5,6 \cdot 10^{-7} K^{-2}$$

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} [d + ex_v^2] \quad \text{Ecuación (C.6)}$$

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, c_0, c_1, d, e$: Constantes.

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,58123 \cdot 10^{-6} KPa^{-1} & b_1 &= -2,051 \cdot 10^{-8} Pa^{-1} \\ a_1 &= -2,9331 \cdot 10^{-8} Pa^{-1} & c_0 &= 1,9898 \cdot 10^{-4} KPa^{-1} \\ a_2 &= 1,1043 \cdot 10^{-10} K^{-1} Pa^{-1} & c_1 &= -2,376 \cdot 10^{-6} Pa^{-1} \\ b_0 &= 5,707 \cdot 10^{-6} KPa^{-1} & d &= 1,83 \cdot 10^{-11} K^2 Pa^{-2} \\ & & e &= -0,765 \cdot 10^{-8} K^2 Pa^{-2} \end{aligned}$$

D. ANEXO: ALGORITMOS DE AVANCE DE TIEMPO.

ALGORITMO DE AVANCE DE TIEMPO.

Para flujos dependientes del tiempo, la forma discretizada de la ecuación generalizada de transporte es:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \bar{v} d\bar{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi d\bar{A} + \int_V S_\phi dV \quad \text{Ecuación (D.1)}$$

$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$: forma conservativa de la variable transiente ϕ

ρ : densidad

\bar{v} : vector velocidad = $u\hat{i} + v\hat{j}$

\bar{A} : vector Área de superficie

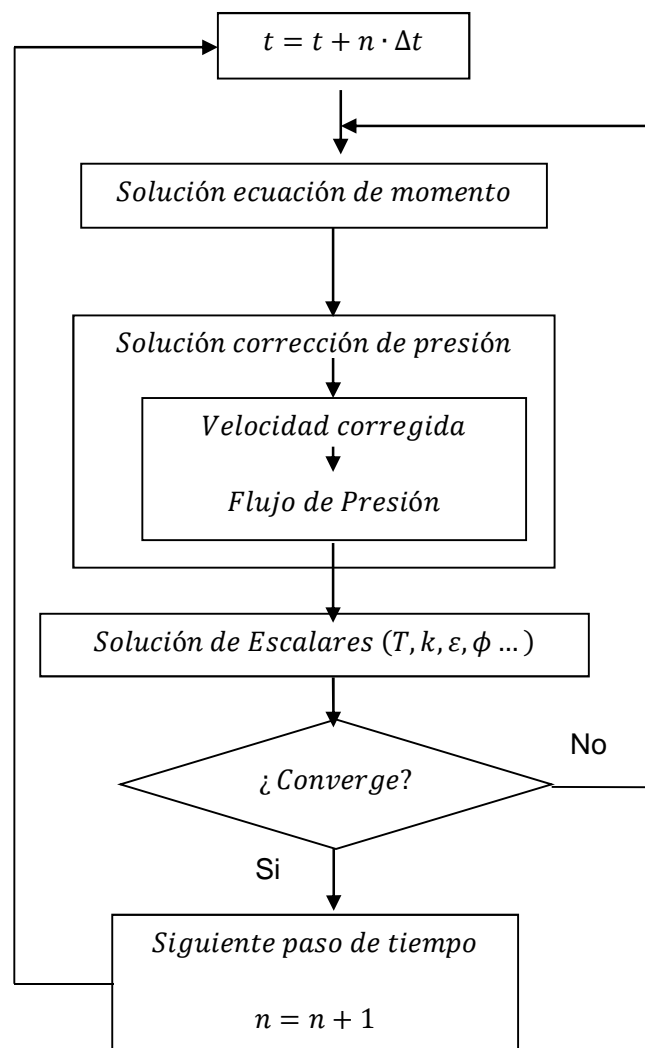
Γ_ϕ : coeficiente de difusión de ϕ

$\nabla \phi$: gradiente de $\phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \hat{j}$

S_ϕ : término fuente de ϕ por volumen unitario

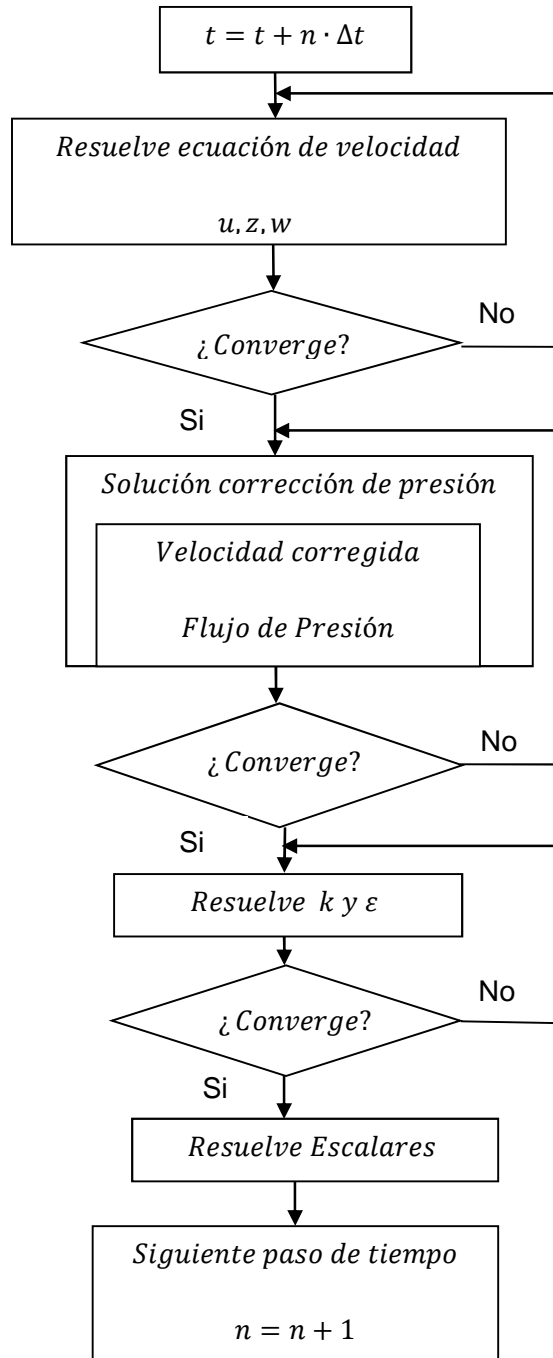
ITERATIVE TIME-ADVANCEMENT

Esquema del algoritmo iterativo de avance en el tiempo. Este algoritmo resuelve iterativamente todas las ecuaciones para un paso de tiempo dado hasta que se cumpla el criterio de convergencia.



NON-ITERATIVE TIME-ADVANCEMENT

Esquema del algoritmo no iterativo de avance en el tiempo.



E. ANEXO: MODELO DE EVAPORACIÓN-CONDENSACIÓN.

El modelo de evaporación-condensación se encuentra disponible con los modelos multifásicos de mezcla y euleriano [14]. La transferencia de masa entre líquido y vapor es gobernada por la ecuación de transporte:

$$\frac{\partial(a\rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (a\rho_v \vec{V}_v) = m_{l \rightarrow v} - m_{v \rightarrow l} \quad \text{Ecuación (E.2)}$$

$v = \text{fase de vapor}$; $a = \text{fracción de volumen de vapor}$;
 $\rho_v = \text{densidad de vapor}$;

$\vec{V}_v = \text{velocidad de la fase de vapor}$

$m_{l \rightarrow v}, m_{v \rightarrow l}$: tasa transferencia de masa por evaporación y condensación, respectivamente

El lado derecho de la ecuación define como positiva la transferencia de masa desde el líquido al vapor para los problemas de evaporación-condensación. La transferencia de masa se puede describir como sigue a continuación:

$$\begin{aligned} T > T_{sat} & \quad m_{l \rightarrow v} \\ & = \text{coeff} * a_l \rho_l \frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \\ T < T_{sat} & \quad m_{l \rightarrow v} \\ & = \text{coeff} * a_v \rho_l \frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (E.3)}$$

coeff: es un coeficiente que necesita ser perfeccionado y se puede interpretar como un factor de relajación de tiempo, a y ρ son la fracción volumétrica de la fase y su densidad. El término fuente de la ecuación de energía se obtiene multiplicando la tasa de transferencia de masa por el calor latente.

Considerando la fórmula de Hertz Knudsen que definió el flujo de evaporación – condensación basado en la teoría cinética para una interfase plana.

$$F = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} (P^* - P_{sat}) \quad \text{Ecuación (E.4)}$$

Las unidades del flujo son $Kg/(s/m^2)$.

P = presión ; T = temperatura ; R = constante universal de los gases ; β = coeficiente de adaptación, muestra cuántas moléculas de vapor van a la superficie del líquido y son absorbidas por ésta ; P^* = representa la presión de vapor parcial en la interfase en el lado del gas.

La ecuación de Clapeyron-Clausius relaciona la presión con la temperatura en condiciones de saturación.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_g - v_l)} \quad \text{Ecuación (E.5)}$$

v_g y v_l = inverso de la densidad del gas y el líquido respectivamente (m^3/Kg) ; L = calor latente (J/Kg)

Basado en la expresión diferencial, se puede obtener la variación de temperatura en función de la variación de presión cercana a la condición de saturación. La ecuación de Clausius Clapeyron ofrece la siguiente fórmula en tanto que P^* y T^* estén cerca de la condición de saturación.

$$(P^* - P_{sat}) = -\frac{L}{T(v_g - v_l)} (T^* - T_{sat}) \quad \text{Ecuación (E.6)}$$

Usando esta relación en la ecuación Herts Knudsen se tiene:

$$F = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L \left(\frac{\rho_g \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{(T^* - T_{sat})}{T_{sat}} \quad \text{Ecuación (E.7)}$$

El factor β está definido por el coeficiente de adaptación y por las características físicas del gas. β tiende a 1.0 en condiciones cercanas al equilibrio.

Si se asume que todas las burbujas de vapor tienen el mismo diámetro, entonces la densidad del área interfacial está dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{A_i}{V_{cell}} = \frac{6a_y}{d} \quad \text{Ecuación (E.8)}$$

V_{cell} = corresponde al volumen de la celda.

El término fuente de la fase ($Kg/s/m^3$) debe tener la forma:

$$\begin{aligned} & F \frac{A_i}{V_{cell}} \\ &= \frac{6}{d} \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L\left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g}\right) \left[\rho_g \alpha_v \frac{(T^* - T_{sat})}{T_{sat}} \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación (E.9)}$$

$$coeff = \frac{6}{d} \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L\left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g}\right) \quad \text{Ecuación (E.10)}$$

F. ANEXO: PROPIEDADES DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE SODIO.

Se muestran las propiedades de una solución acuosa de cloruro de sodio [15].

Tabla F.1: Densidad de una solución acuosa de cloruro de sodio en función de su porcentaje en peso (%) y la temperatura (°C). [15]

Densidad de una solución acuosa de NaCl							
Porcentaje en peso	Temperatura °C						
	0	10	25	40	60	80	100
1	1,00747	1,00707	1,00409	0,99908	0,9900	0,9785	0,9651
2	1,01509	1,01442	1,01112	1,00593	0,9967	0,9852	0,9719
4	1,03038	1,02920	1,02530	1,01977	1,0103	0,9988	0,9855
8	1,06121	1,05907	1,05412	1,04798	1,0381	1,0264	1,0134
12	1,09244	1,08945	1,08365	1,07699	1,0667	1,0549	1,0420
16	1,12416	1,12056	1,11401	1,10688	1,0962	1,0842	1,0713
20	1,15663	1,15254	1,14533	1,13774	1,1268	1,1146	1,1017
24	1,18999	1,18557	1,17775	1,16971	1,1584	1,1463	1,1331
26	1,20709	1,20254	1,19443	1,18614	1,1747	1,1626	1,1492

Tabla F.2: Calor Específico de solución acuosa de cloruro de sodio en función de la temperatura y el % molar. [15]

Calor específico cal/gr°C				
Porcentaje molar	Temperatura °C			
%	6	20	33	57
0,249	-	0,99	-	-
0,99	0,96	0,97	0,97	-
2,44	0,91	0,915	0,915	0,923
9,09	0,805	0,81	0,81	0,82

Tabla F.3: Viscosidad dinámica de solución acuosa de cloruro de sodio en función de la temperatura y el % peso. [16]

		Constantes						
	Temperatura (°C)	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
NaCl	$a \cdot 10^3 =$	4,9	9,2	10,65	10,9	10,7	10,2	9,75
	$b \cdot 10^3 =$	1,93	1,41	1,125	0,93	0,79	0,69	0,605
0%	η_w	1,794	1,519	1,31	1,145	1,009	0,895	0,8
20%	η	2,663	2,269	1,973	1,733	1,538	1,376	1,24

Para el rango de temperatura entre 0 °C - 30 °C y porcentaje en peso de sal en el agua entre 0% - 20%, a partir de la Tabla F.3 se puede calcular la viscosidad dinámica con la Ecuación F.1.

$$\eta = (\eta_w + ap + bp^2) \pm 0,5\% \quad \text{Ecuación (F.1)}$$

$$\eta \text{ (Centipiose)}$$

La conversión para trabajar en ANSYS es $1(cP) = 0,001(Kg/ms)$