



PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA EVAPORACIÓN DE UNA GOTA
LÍQUIDA EN UN MEDIO GASEOSO PARA UN SISTEMA DE
ACONDICIONAMIENTO DE EXTERIORES**

Consalvo, Paul – LU 1040165

Ingeniería Electromecánica

Tutor:

Larreteguy, Axel, UADE

Co-Tutor:

Carón, Pablo, UADE

Noviembre 3, 2017



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

Agradecimientos

A mis tutores, Axel Larreteguy y Pablo Caron, por estar a disposición a lo largo de todo el proyecto.

A mi amada, Marianela Cafrune, por nunca fallarme, y a su familia por apoyarme cuando más lo necesitaba.

A mis hermanos por ser siempre mi soporte.

A mi hermana por ser mi guía.

A mi madre por ser mi motivación.

A mi padre por ser mi inspiración.

Resumen

Se estudiaron los modelos matemáticos y computacionales existentes relacionados con el proceso de evaporación de una gota líquida en un medio gaseoso con el fin de diseñar conceptualmente una torre de enfriamiento que utilice el principio de refrigeración evaporativa. Se modeló el sistema unidimensional utilizando el entorno de cálculo técnico MATLAB®. Se realizó también la simulación tridimensional de una torre de enfriamiento representada por un sumidero de calor mediante el método de volúmenes finitos utilizando como parámetro de entrada a un acople de los resultados del modelado. Se seleccionó el solver buoyantBoussinesqPimpleFoam del paquete de código abierto OpenFOAM®, para resolver el modelo transitorio turbulento. Se realizó un diseño esquemático básico del dispositivo que será la torre de enfriamiento.

Las simulaciones bidimensionales realizadas devolvieron resultados cualitativamente correctos en comparación con los procesos de convección natural y con el sistema modelado.

Abstract

Existing mathematical and computational models related to the evaporation process of a liquid drop in a gaseous medium were studied in order to conceptually design a cooling tower using the evaporative cooling principle. The one-dimensional system was modeled using the MATLAB® technical calculation environment. Also, a three-dimensional simulation was carried out regarding a cooling tower represented by a heat sink using the finite volume method employing as input parameters a coupling of the modeling results. The buoyantBoussinesqPimpleFoam solver of the OpenFOAM® open source package was selected to solve the turbulent transient model. A basic schematic design of the device that will be the cooling tower was made.

The two-dimensional simulations performed returned qualitatively correct results in comparison with natural convection processes and with the modeled system.

Contenidos

Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Abstract	4
1.Introducción.....	7
2.Antecedentes	9
2.1 Sistemas de supresión de fuego.....	11
2.2 Usos en Invernaderos y en la Agricultura	13
3. Descripción.....	14
4. Metodología de Desarrollo.....	15
4.1 Teoría.....	17
4.1.1 Sedimentación de gotas acuosas esféricas en aire	18
4.1.2 Evaporación en vuelo de gotas	25
4.2 Modelado.....	32
4.2.1 Variación del Diámetro.....	34
4.2.2 Variación de la Temperatura Ambiente y del Sumidero	35
4.2.3 Variación de Humedad Relativa.....	37
4.2.4 Convergencia	38
4.2.5 Resultados del Modelado.....	38
4.3 Simulación.....	43
4.3.1 Estructura y Mesh	45
4.3.2 Solver.....	52
4.3.3 Acople MATLAB® con OpenFOAM®.....	56
4.3.4 Parámetros Termodinámicos y Condiciones de Borde.....	58
4.3.5 Resultados de la Simulación.....	58
5 Discusión	66

6 Conclusión.....	68
Apéndice A: Valores empleados en el Modelado	71
Variables Químicas y ambientales	71
Variables Físicas.....	71
Apéndice B: Métodos Numéricos Empleados a la Evaporación.....	72
Velocidad de Sedimentación	72
Tasa de Evaporación	73
Apéndice C: Presión de vapor y humedad	75
Apéndice D: Varias ecuaciones empíricas	77
Densidad del Aire	77
Densidad del Agua	77
Viscosidad del Aire	78
Coeficiente de Difusión de vapor de agua en aire.....	79
Apéndice E: Diseño Conceptual.....	80
Apéndice F: Códigos	86
Tasa de Evaporación	86
Velocidad de Sedimentación	88
Variación del Diámetro	88
Variación de la Temperatura Ambiente y del Sumidero	89
Variación de la Humedad Relativa.....	90
Convergencia.....	91
Bibliografía.....	93

1.Introducción

El presente proyecto final de Ingeniería tiene por objetivo modelar y simular computacionalmente el proceso de evaporación de una gota líquida en un medio gaseoso con el fin de disminuir la temperatura ambiente en ambientes semiabiertos, como también el diseño conceptual del dispositivo (torre de enfriamiento) que permitirá su aplicación. Como ubicación principal de este sistema, se optó por utilizar una simplificación del patio de la Universidad Argentina de la Empresa (UADE) para realizar las simulaciones.

Para llevarlo a cabo, se definieron los siguientes objetivos:

- Hallar las ecuaciones que gobiernan el proceso de evaporación de una gota líquida en un medio gaseoso, la tasa de disminución de su diámetro, su velocidad de descenso y su relación con la disminución de la temperatura ambiente.
- Programar los códigos necesarios utilizando MATLAB® para resolver tanto las ecuaciones diferenciales encontradas como las distintas incógnitas necesarias.
- Simular el comportamiento del sistema en OpenFOAM®.
- Realizar un diseño conceptual de los componentes a utilizar para el armado del sistema de acondicionamiento de aire.

Para facilitar la comprensión del informe, se ha adoptado el formato detallado a continuación:

- **Antecedentes:** Se analiza el estado del arte al momento de comenzar con el desarrollo y se mencionan los distintos sistemas empleados hoy para fines similares. Se incluyen además el principio básico empleado en estos sistemas.
- **Descripción:** Aquí se detallan los requerimientos que debería cumplir el dispositivo a diseñar.
- **Metodología de Desarrollo:** Comienza explicando los conceptos y las ecuaciones a resolver necesarias para estudiar el comportamiento del sistema. Luego explica la forma de resolución y los distintos métodos cuantitativos empleados, conjuntamente con los resultados arrojados. Continúa con el proceso de simulación del sistema según condiciones ambientales preestablecidas. Por último, se detalla el diseño básico a utilizar para el sistema de enfriamiento.

- **Discusión:** Se comparan los resultados de las pruebas con los arrojados por la simulación, indicando limitaciones y dificultades encontradas, y detallando correcciones a realizar sobre el diseño del dispositivo para lograr un mejor resultado.
- **Conclusión:** Se detallan apreciaciones finales respecto al proyecto realizado.

2. Antecedentes

El proceso de evaporación de una gota líquida se empezó a investigar desde hace ya mucho tiempo (Ranz W E & Marshall W R, 1952) ya que se aplica a múltiples campos de la ingeniería.

En el área automotriz, se realizaron investigaciones en procesos de evaporación de gotas de combustible líquido y la variación de esta tasa según la forma del rociador (Bertoli C, 1999). Respecto al acondicionamiento de aire, se buscó realizar el modelado de la evaporación por aspersión del agua para el enfriamiento pasivo de edificios (Belarbi R, 2006). En la agricultura, los estudios se basaron en su aplicación en el riego por aspersión para el cultivo (RJ, 1985). El proceso de evaporación de gotas también se manifestó en los estudios llevados a cabo por establecimientos de supresión de incendios para eficientizar dicho apagado (Chen YC, 1996). Otros campos tales como la geofísica (Rouault M, 1991), la meteorología (Nurnberger FV, 1976) y el mundo de los lechos fluidizados (Qureshi M, 2006), también aportaron a la recopilación de información respecto a este fenómeno.

Si bien su aplicación podrá variar, el principio empleado es generalmente idéntico. La mayoría de los diseños aprovechan el hecho de que el agua tiene una de las entalpías de vaporización (calor latente de vaporización) más altas conocidas de cualquier sustancia común. Debido a esto, los enfriadores evaporativos utilizan sólo una fracción de la energía de compresión de vapor o sistemas de aire acondicionado de absorción.

Existen principalmente tres tipos de sistemas:

- **Enfriamiento Evaporativo Directo:** El enfriamiento evaporativo directo (circuito abierto) se usa para bajar la temperatura y aumentar la humedad del aire usando calor latente de evaporación, transformando el agua líquida a vapor de agua. En este proceso, la energía en el aire no cambia. El aire seco y caliente cambia a aire fresco y húmedo. El calor del aire exterior se utiliza para evaporar el agua. Una unidad de refrigeración por evaporación directa mecánica utiliza un ventilador para aspirar aire a través de una membrana o almohadilla húmeda, que proporciona una gran superficie para la evaporación del agua en el aire. El agua es rociada en la parte superior de la almohadilla para que pueda gotear hacia abajo en la membrana y mantener continuamente la

membrana saturada. Cualquier exceso de agua que gotea desde el fondo de la membrana se recoge en una cacerola y se recircula a la parte superior. Los enfriadores evaporativos directos de una etapa son típicamente de pequeño tamaño, ya que sólo consiste en la membrana, la bomba de agua y el ventilador centrífugo. El enfriamiento evaporativo directo pasivo puede ocurrir en cualquier lugar que el agua enfriada evaporativamente pueda enfriar un espacio sin la ayuda de un ventilador. Esto se puede lograr mediante el uso de fuentes o más diseños arquitectónicos, como la torre de enfriamiento evaporativa, también llamada "torre de enfriamiento pasivo".

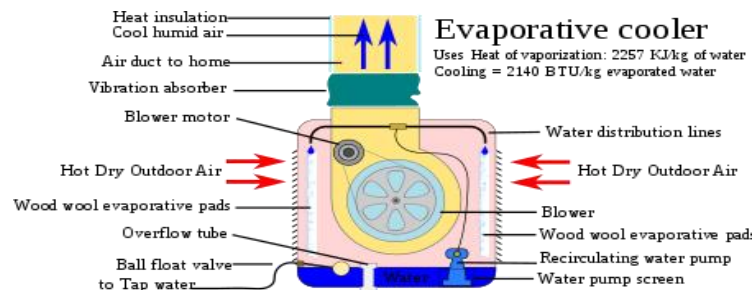


Figura 1: Equipo de Enfriamiento por Evaporación

(McDowall, 2006)

- **Enfriamiento Evaporativo Indirecto:** El enfriamiento evaporativo indirecto (circuito cerrado) es un proceso de enfriamiento que utiliza refrigeración evaporativa directa además de algún tipo de intercambiador de calor para transferir la energía fría al aire de suministro.
- **Enfriamiento Evaporativo de dos etapas:** En la primera etapa de un enfriador de dos etapas, el aire caliente es pre-enfriado indirectamente sin añadir humedad (pasando dentro de un intercambiador de calor que se enfría por evaporación en el exterior). En la etapa directa, el aire pre-enfriado pasa a través de una almohadilla empapada de agua y recoge humedad mientras se enfría.

Desafortunadamente, excepto en climas muy secos, el enfriador (directo) de una sola etapa puede aumentar la humedad relativa (HR) a un nivel que hace que los ocupantes se sientan incómodos. Enfriadores evaporativos indirectos y de dos etapas mantienen la humedad relativa más baja. Para impedir este cúmulo de humedad utilizando el enfriador directo, es imprescindible una corriente de aire. De esta forma se logra la recirculación necesaria para impedir el aumento de la humedad relativa en cantidades desfavorables para su uso.

2.1 Sistemas de supresión de fuego

El mayor avance respecto a la teoría detrás del proceso de evaporación de una gota líquida se logró gracias a la necesidad de suprimir fuegos de manera controlada.

Dado que los sistemas automáticos de extinción de incendios podían detectar y extinguir el fuego sin intervención humana, se hicieron populares entre las construcciones residenciales y públicas. Los sistemas de rociadores son los sistemas de supresión más populares en el mundo gracias a su supresión rápida y ventajas económicas. Sin embargo, algunos lugares pueden requerir menos agua y menos daño a los materiales, como los incendios ocurridos en una biblioteca, los cuales no son adecuados para adoptar los sistemas de rociadores.

Los sistemas de niebla de agua dieron lugar a una demanda baja de agua y sistemas de alta eficiencia para reemplazar sistemas de rociadores. Dado que el halón ha sido prohibido debido a problemas ambientales, la niebla del agua se convirtió en una alternativa potencial para reemplazar el extintor de halones. Hoy en día, los sistemas de supresión de la niebla del agua se utilizan en fuegos de la piscina, cabinas de aviones, espacios a bordo, áreas de almacenamiento inflamables, sistemas de ferrocarril subterráneo, museos, estructuras históricas y aplicaciones informáticas y electrónicas.



Figura 2: Boquilla de sistema de supresión de incendio mediante la niebla (PHIREX Melbourne Water Mist Fire Extinguishing Systems, 2012)

La niebla de agua se refiere a la pulverización de agua para la cual el 99% de la distribución volumétrica acumulativa de la gota de agua es menor a 1.000 μm (National Fire Protection Association, 2015). La extracción de calor, el desplazamiento del oxígeno y la atenuación de la radiación son los tres mecanismos dominantes en la supresión de incendios mediante la niebla de agua. La extracción de calor, también conocido como enfriamiento, es un proceso en donde se busca bajar la temperatura ambiente transformando la niebla del agua desde la fase líquida a la fase gaseosa. En la atenuación de la radiación, cuando la niebla entra en el espacio entre la llama y la superficie del combustible, se busca reducir la evaporación de combustible, así como la combustión.

En esta temática se presentó por primera vez el análisis computacional fluidodinámico respecto a este proceso, arrojando resultados pioneros respecto a la tasa de la disminución de la temperatura según el caudal y el tamaño de las gotas individuales que conformaban la niebla.

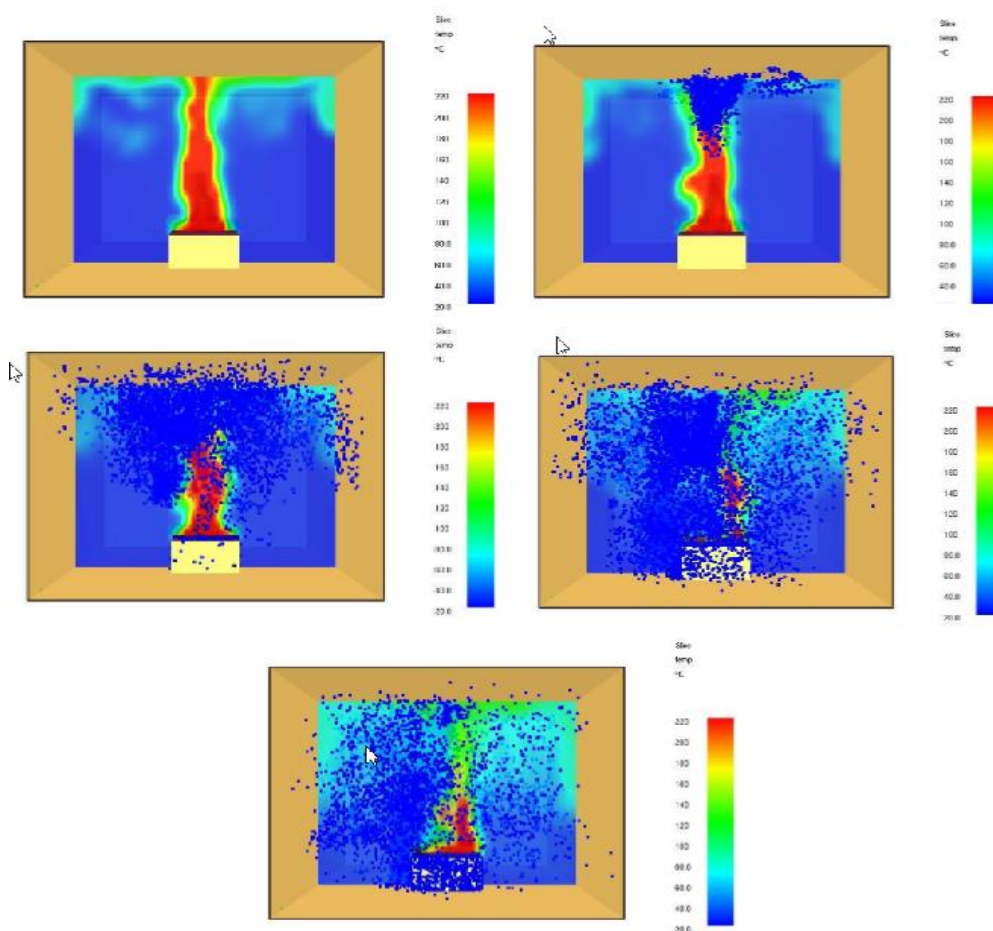


Figura 3: Simulación de la disminución de la temperatura en un incendio usando el sistema de niebla (Wang, 2013)

2.2 Usos en Invernaderos y en la Agricultura



Figura 4: Sistema de niebla en un invernadero (Industrial Mist System - Greenhouse , 2017)

Uno de los usos más comunes es en invernaderos y en cultivos agropecuarios, donde los sistemas de nebulización se utilizan para controlar la temperatura, así como los niveles de humedad. Los mezcladores de invernaderos se pueden configurar en un sistema temporizado para que funcionen a ciertas horas del día o en un sistema de sensores de manera tal que cuando la humedad relativa alcanza un cierto nivel, los *misteros* se ponen en acción.

Es importante notar y distinguir que la finalidad de los sistemas presentados anteriormente es tanto enfriar el ambiente, como también humedecer. El presente trabajo estudiará la posibilidad de mantener la primera finalidad al mismo tiempo que intenta reducir el aumento de la humedad relativa ambiente, ya que esto impacta directamente en la sensación de confort para quien use el sistema.

3. Descripción

El presente proyecto final de ingeniería se centra en el modelado unidimensional del proceso de evaporación de una gota líquida en un medio gaseoso, como también su simulación bidimensional (aprovechando simetría de revolución cilíndrica), conjuntamente con un diseño básico del dispositivo capaz de realizar dicho proceso, basándonos en un modelo cilíndrico.

En cuanto a los requerimientos a satisfacer, se encontraron los siguientes:

- Modelar el sistema de enfriamiento matemáticamente tal que arroje resultados convergentes que concuerden con la teoría boyante de transferencia de calor.
- Diseñar esquemáticamente el sistema de enfriamiento de manera tal que pueda disminuir la temperatura ambiente en al menos 4° C.
- Lograr velocidades de recirculación de la corriente de aire enfriada suficientes tanto como para impedir el cúmulo significativo de humedad, como también para lograr una sensación de confort en el usuario.
- Elegir el material constructivo adecuado acorde al diseño estructural de manera tal que se logre el menor costo de producción posible, conjuntamente con dimensiones y pesos aceptables para su uso en sitios semiabiertos (en este estudio en particular, en el patio de UADE).

En la siguiente sección se detallarán los pasos atravesados desde el análisis de las variables físicas y químicas, el modelado y la simulación del sistema, hasta el diseño conceptual del dispositivo.

4. Metodología de Desarrollo

Como se mencionó, el fin del documento es asentar una base respecto a la viabilidad de una torre de enfriamiento que funcione utilizando el fenómeno de evaporación. El funcionamiento del dispositivo no puede ser modelado ni simulado tal cual se comporta de manera conveniente (no existen fórmulas que admitan variables como tamaño de atomizador, altura de torre, tiempo prendido, etc.). Pero lo que sí existe, es una manera de utilizar la consecuencia del accionamiento de la torre, como parámetro físico. Esta consecuencia es su efecto de sumidero térmico.

Para lograr modelar y simular adecuadamente el comportamiento del sistema, debemos hallar la curva que describe al sumidero térmico que proveerá la torre. Entonces, de manera poco convencional, para facilitar la interpretación de las deducciones teóricas y de los resultados del modelado y la simulación se mostrará a continuación uno de los posibles diseños conceptuales de la torre de enfriamiento que fue realizado.



Figura 5: Torre de enfriamiento en vista isométrica (diseño conceptual propio)

A lo largo del informe, se harán simplificaciones respecto a sus dimensiones, como también la de su alrededor (en este caso, el patio de UADE) para modelar de forma eficiente (es decir, disminuyendo potencia computacional y horas de cálculo necesarias) el sistema,

siempre recordando que el fin último es asimilar su comportamiento lo máximo posible con el de un sumidero térmico. Los detalles respecto al diseño y sus componentes básicos se mencionarán en el Apéndice E, aunque no de manera profunda ya que la especificación del sistema en sí escapa el alcance de la presente tesis. Se distinguirán los principios básicos del funcionamiento, la funcionabilidad que provee y posibles modificaciones que se podrían realizar para aumentar la eficiencia del dispositivo.

Anticipando las dimensiones que serán nombradas capítulos más adelante, el alto total es de 10 metros, siendo la altura de los pasajes o aberturas de 4 metros cada uno, dando el resto de la estructura (su corazón, ya que en esos 6 metros se basará el análisis) un largo de 6 metros. El diámetro superior es de 4 metros mientras que el inferior es de 5 metros. Las aberturas tienen como finalidad permitir el tránsito del alumnado y profesores sin causar problemas.

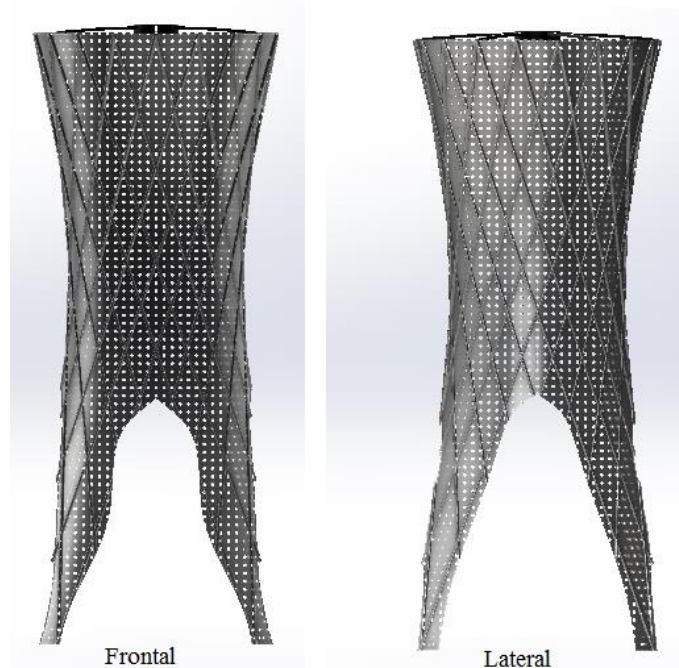


Figura 6: Vista frontal y lateral de la torre enfriamiento

4.1 Teoría

La presente tesis se irá desarrollando en capas, cada una agregando un determinado nivel de complejidad al análisis para lograr generar una correlación certera con la física del mundo real.

Para una comprensión clara y sistemática de los procesos involucrados con la aplicación de spray y su proceso de difusión, uno tiene que considerar tanto aspectos cinemáticos de las gotas, como la evaporación del agua atomizada.

Cuando estas gotas consisten principalmente de agua, la evaporación en vuelo también debe ser contabilizada. Esta sección trata acerca de la teoría de tanto los aspectos cinemáticos como los aspectos evaporativos de las gotas de agua en vuelo.

La sección se divide en dos capítulos principales: uno sobre la cinemática y otro sobre la evaporación. Al principio tratar con estos dos temas en un informe puede parecer extraño. De hecho, el capítulo en cinemática se puede leer independientemente. Sin embargo, la comprensión de la evaporación de las gotas en el aire requiere referencias a aspectos cinemáticos.

En el capítulo cinemático se describe el movimiento de una gota esférica a través del aire. La gota experimenta fuerzas como la gravedad y la resistencia del aire, que determinan su trayectoria a través del aire. Velocidad inicial, el tamaño de la gota y la velocidad del viento son factores importantes. Después de una discusión sobre flujo turbulento, aspectos ligeramente más prácticos como velocidad de sedimentación y tiempo de evaporación en vuelo son discutidos. Las secciones finales sobre impacto y cálculos de trayectoria tienen aplicaciones claramente prácticas para estudiar la corriente y el depósito tanto teóricamente como experimentalmente.

El capítulo que le sigue trata acerca de la evaporación de las gotas acuosas en el aire. Los parámetros importantes son: la temperatura del aire ambiente y la humedad relativa, así como aspectos relacionados con la propia gota: su tamaño y velocidad relativa. En una primera aproximación, los procesos transitorios que ocurren poco después de la creación de gotas son despreciados, resultando en una descripción relativamente simple de velocidad de evaporación y tiempo de vida de las gotas. Sin embargo, para una comprensión completa de la evaporación, los procesos transitorios también deben ser considerados. Estos procesos comprenden la

adaptación de la velocidad (normalmente desaceleración rápida) y enfriamiento (debido a la evaporación) de la gota. Afortunadamente, resulta que las escalas de tiempo involucradas con los procesos transitorios son muy breves y en todos los casos prácticos, estos procesos pueden ser, de hecho, desestimados.

4.1.1 Sedimentación de gotas acuosas esféricas en aire

4.1.1.1 Flujo Laminar

Durante muchas décadas se evaluó la resistencia de un objeto rígido a un fluido que fluye a su alrededor, determinando así el notorio *Número de Reynolds*. Para números de Reynolds relativamente bajos (es decir, flujo relativamente bajo de velocidad) el flujo de fluido alrededor del objeto es laminar: consta de capas imaginarias de fluido con diferentes velocidades, fluyendo suavemente alrededor del objeto.

Las alteraciones accidentales en el campo de flujo disminuirán y desaparecerán en el *flujo laminar*. La Resistencia o *fuerza de Arrastre/ Drag* sobre el objeto está determinada por la fricción entre estas capas de fluido. Para un objeto pequeño en caída libre, la fuerza de arrastre se describe por la *ley de Stokes*, dependiendo de la viscosidad del líquido, del tamaño del objeto y de la velocidad relativa del líquido con respecto al objeto.

Al aumentar el número de Reynolds, pequeñas perturbaciones en el campo del flujo laminar ya no desaparecerán. En su lugar, pueden aumentar y eventualmente la estructura laminar del flujo será perdida completamente, apartado de una capa límite laminar cerca de la superficie del objeto. Se dice que el flujo principal es un *flujo turbulento*. Ahora la fuerza de arrastre se determina principalmente por fricción en las partes turbulentas del líquido; la contribución de la fricción en la "cáscara laminar" alrededor del objeto es relativamente pequeña. En la parte trasera del objeto la capa límite finalmente se separa, creando una estela turbulenta (vórtice). Para la gama de situaciones en donde $Re > 0,25$, la ley de Stokes ya no es aplicable, por lo que también se utiliza el término flujo no-Stokes. En el flujo turbulento, la fuerza drag se puede describir introduciendo un "*coeficiente de arrastre*", que depende de la

forma del objeto (y con frecuencia también en el número de Reynolds). Físicamente la transición de laminar a turbulento siempre ocurre gradualmente, pero por conveniencia de discusión, los flujos laminares y turbulentos se consideran como dos regímenes de flujo claramente diferenciados.

Matemáticamente, flujos laminares resultan ser un "caso especial" de las ecuaciones de flujo generales usadas para describir el flujo turbulento. Las gotas líquidas que caen o que flotan en el aire a menudo se pueden describir de la misma manera, siempre que las gotas se puedan considerar esféricas a lo largo. En la mayoría de los casos prácticos, incluyendo la aplicación de spray en la protección de los cultivos, el flujo de aire alrededor de las gotas es turbulento porque los números de Reynolds son demasiado altos. Para describir la trayectoria de una gota que cae en aire, uno necesita saber el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.

En la literatura, la relación entre el coeficiente de drag y el número de Reynolds siempre es empírica, y generalmente es descrito de tal manera que el manejo matemático (principalmente la integración analítica) es facilitado. En muchos casos surge un conjunto de relaciones, cada una de las cuales es válida sólo para un intervalo relativamente pequeño de números de Reynolds. Para cubrir una amplia gama de los números de Reynolds, el conjunto entero debe ser utilizado, a menudo con discontinuidades al ir de una relación a otra.

Esta sección describe las fuerzas de arrastre en una gota esférica en el aire, y una relativamente simple y amplia relación empírica entre el coeficiente de resistencia y el número de Reynolds. Conceptos posteriores como *velocidad de sedimentación*, *distancia de parada* y *tiempo de descenso* se discutirán también.

La resistencia al aire de objetos de forma arbitraria en una corriente de aire se describe usualmente usando el número de Reynolds R_e :

$$R_e = \frac{\rho_a D v}{\eta_a} \quad [\text{Adimensional}] \quad (1)$$

donde D es una medida característica del tamaño del objeto, v es su velocidad relativa a la corriente de aire, ρ_a es la densidad del aire, y η_a es la viscosidad dinámica del aire. Para objetos esféricos el parámetro de tamaño obvio es el diámetro de la esfera (D).

Para $Re < 0,25$, el flujo alrededor de la esfera es completamente laminar. La fuerza de drag es igual a la resistencia viscosa del aire, y la ley de Stokes es aplicable:

$$F_{d,st} = 3\pi\eta_a Dv \quad [\text{N}] \quad (2)$$

se añade el subíndice St para aclarar que la ecuación es válida sólo en el régimen de Stokes (es decir, la multitud de situaciones donde se cumple aproximadamente que $Re < 0,25$).

Las gotas en el aire experimentan dos fuerzas: la fuerza de arrastre debido a la resistencia del aire como se describió anteriormente, y la gravitacional. La última fuerza está dada por:

$$F_g = mg = \frac{1}{6}\pi\rho_l g D^3 \quad [\text{N}] \quad (3)$$

donde ρ_l es la densidad de la gota líquida, y g es la aceleración gravitacional ($9.81 \frac{m}{s^2}$).

Eventualmente las fuerzas se equilibrarán y la gota caerá a una velocidad constante: su llamada velocidad de sedimentación. De la ecuación (2) y (3) se deduce que la velocidad de sedimentación en el régimen de Stokes es igual a:

$$v_{s,st} = \frac{\rho_l g D^2}{18\eta_a} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (4)$$

El índice s se refiere a sedimentación. Se debe tener en cuenta que con flujo laminar la velocidad de sedimentación es proporcional al cuadrado del diámetro de la gota. A velocidad de sedimentación constante, el número de Reynolds se sigue de las ecuaciones (1) y (4):

$$Re_{s,st} = \frac{\rho_a \rho_l g D^3}{18\eta_a^2} \quad [\text{Adimensional}] \quad (5)$$

De esta manera queda evidenciado que $Re_{s,st}$ aumentará muy rápidamente con el aumento del tamaño de la gota. Como se mencionó anteriormente, en el Régimen de flujo laminar el número de Reynolds está limitado a $Re < 0,25$. Así, a partir de la ecuación (5), la mayor gota que se sedimenta en flujo de Stokes puede derivarse como: $D < 50 \mu\text{m}$ (con $\rho_a = 1,2 \frac{kg}{m^3}$, $\eta_a = 18 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\rho_l = 998 \frac{kg}{m^3}$).

4.1.1.2 Flujo General

Más allá del régimen de flujo laminar e incluso en cierto rango dentro del régimen también, la ley de Stokes no da una buena descripción de la fuerza de arrastre, ya que la estela

turbulenta produce una resistencia adicional. La fuerza neta de arrastre sobre un objeto de forma arbitraria tiende ahora a ser proporcional al cuadrado de la velocidad:

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho_a A v^2 \quad [\text{N}] \quad (6)$$

donde C_d es el coeficiente de resistencia, que depende de la forma del objeto y del número de Reynolds; A es el área de superficie proyectada del objeto (es decir, su "sombra") según se ve desde arriba. Para una esfera, A es igual $(\pi / 4) D^2$.

El problema ahora es encontrar la relación entre C_d y Re . Con una relación adecuada entre C_d y Re no sólo se puede cubrir el régimen de flujo turbulento, sino también el régimen de flujo laminar. Por lo tanto, para los números bajos de Reynolds, la ecuación (6)

debe ser igual a la ley de Stokes (2) lo que resulta en:

$$C_{d,St} = \frac{24\eta_a}{\rho_a D v} = \frac{24}{Re} \quad [\text{Adimensional}] \quad (7)$$

donde la última igualdad surge de la ecuación (1).

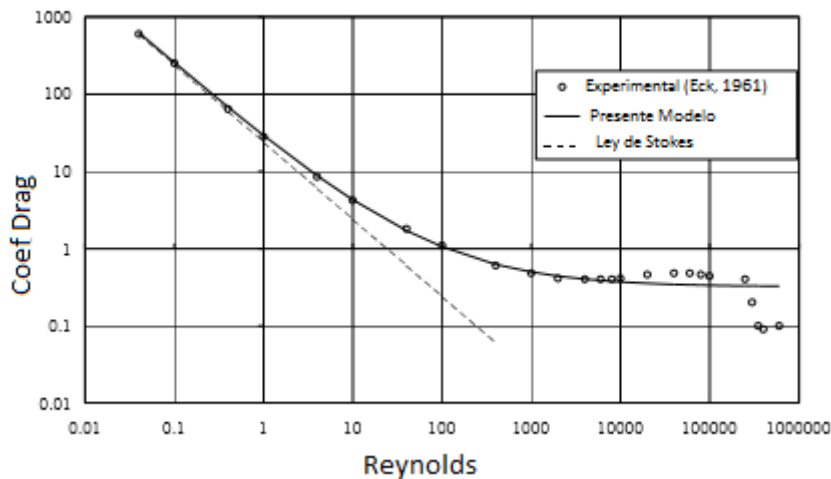


Figura 7: Relación entre coeficiente de Drag y el Número de Reynolds (Eck, 1961)

La Figura 7 muestra datos experimentales para la relación entre C_d y Re para esferas sólidas, así como la relación empírica a ser discutida en la siguiente sección. El resultado según la ley de Stokes (línea discontinua) muestra claramente que sólo es válido para números de Reynolds pequeños.

4.1.1.3 Modelo Empírico del Coeficiente de Drag

Antes de intentar adaptar todos los datos experimentales como se muestra en la Figura 7 para el proyecto, primero se debe investigar qué números de Reynolds son relevantes para aplicaciones de pulverizadores en un sistema de acondicionamiento de exteriores. Claramente, gotas muy pequeñas pueden fluir a muy baja velocidad, por lo que no debe fijarse ningún límite inferior para Re . El límite superior se puede estimar como sigue. Supongamos que la gota más grande que ocurre en la práctica tiene un diámetro de $1000 \mu\text{m}$ ($= 1 \text{ mm}$). Si su velocidad inicial a la salida de la boquilla es de 30 m/s (aproximadamente equivalente a una presión de líquido de 700 kPa para boquillas convencionales), entonces el número de Reynolds siguiente es de aproximadamente 2100 . Obviamente, este es un caso bastante extremo que da una indicación aproximada del límite superior para los números de Reynolds prácticos.

La siguiente relación empírica fue elegida:

$$C_d = \left(\left(\frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c} \quad [\text{Adimensional}] \quad (8)$$

con constantes $a=24$, $b=0,32$ y $c=0,52$. Para $Re \ll 1$, esta ecuación se aproxima $\frac{a}{Re}$, que en realidad requiere $a=24$ para satisfacer la ley de Stokes, según la ecuación (7). Las constantes b y c siguen de optimizar la relación anterior para ajustar datos experimentales en el rango $Re = 0,25 \dots 10^4$. La Figura 7 muestra que el modelo actual se ajusta bien a los datos experimentales para el intervalo dado de números de Reynolds. El modelo no sólo cubre el régimen de flujo turbulento, sino que también es aplicable al régimen de Stokes. Para $Re > 10^4$, el modelo se desvía de los datos experimentales.

4.1.1.4 Velocidad de Sedimentación

Para los flujos laminares, la velocidad de sedimentación ya estaba dada por la ecuación (4) que siguió a partir del equilibrio de la gravedad y la fuerza de arrastre. De manera similar,

extendiendo el concepto de sedimentación al régimen de flujo no-Stokes, las fuerzas dadas por las ecuaciones (3) y (6) deben equilibrarse. Esto da lugar a la siguiente velocidad de sedimentación:

$$v_s = \sqrt{\frac{4\rho_l g D}{3\rho_a C_{d,s}}} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (9)$$

obsérvese que $C_{d,s}$ es el coeficiente de arrastre en la sedimentación; depende de Re (por la ecuación (8)) y por lo tanto de la velocidad de sedimentación misma (usando la ecuación (1)). Esto implica que la velocidad de sedimentación sólo puede calcularse iterativamente, utilizando la expresión anterior. La tasa de convergencia depende del tamaño de la gota, pero se puede demostrar que la velocidad de sedimentación es exacta dentro del 1% después de 6 iteraciones como máximo y dentro del 0,1% después de 8 iteraciones como máximo. Sustituyendo $Cd = 24/Re$ devolverá la Ec. (4), la velocidad de sedimentación en el régimen de Stokes, según lo requerido.

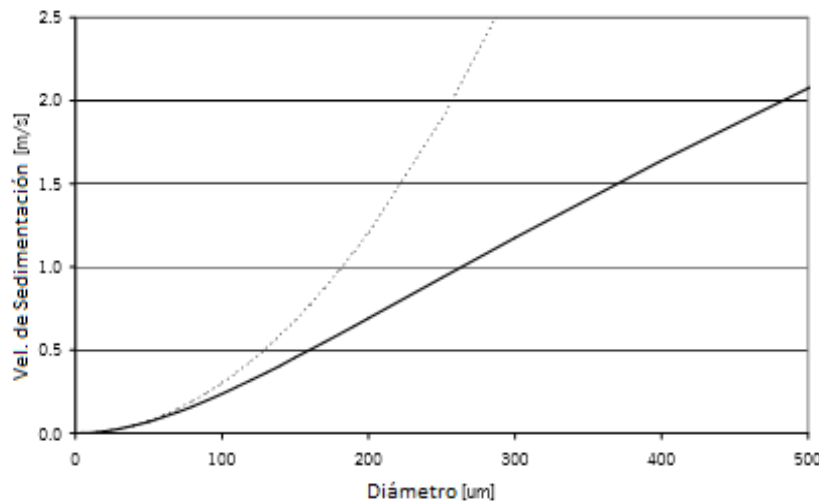


Figura 8: Velocidad de sedimentación de las gotas esféricas de agua.
Línea continua: calculada a partir del modelo de resistencia actual (Eq 9). Línea punteada: velocidad según la ley de Stokes

La Figura 8 muestra la velocidad de sedimentación en función del diámetro de la gota para las gotas de agua en el aire, calculado a partir de la ecuación anterior. La línea discontinua muestra la velocidad calculada a partir de la ecuación (4) si la ley de Stokes fuera válida. Claramente para diámetros de gotas mayores que aproximadamente 50 μm , la ley de Stokes no es aplicable y puede sobrestimar considerablemente la velocidad real.

4.1.1.5 Aclaración de Trayectoria de una Gota en Vientos Cruzados

Terminando la cinemática de la gota, agregaremos cosas a considerar. Debido a que se realizará un modelado unidimensional del proceso de evaporación de una gota en una corriente de aire vertical, desestimaremos la influencia del viento. No obstante, aclararemos como influiría esto en el análisis. Cabe destacar que las diferencias entre la simulación y la vida real son debidas, en mayor proporción, a la velocidad del aire arrastrado, y al perfil logarítmico del viento

Dos aspectos son importantes para determinar la trayectoria de una gota proyectada verticalmente hacia abajo. Primero, la distancia de parada. Es una medida de la distancia que la gota puede penetrar dentro de la corriente de aire antes de haber perdido su propio impulso y esté a merced del viento y la gravedad. Segundo, luego de este tiempo transitorio de desaceleración, la velocidad de sedimentación (junto con la velocidad del viento) determinan el ángulo formado con la vertical de la siguiente parte del trayecto.

Una gota pequeña tiene una corta distancia de parada, mientras su velocidad de sedimentación sea pequeña. Por lo tanto, la trayectoria de tal gota hará una curva pronunciada o aguda de vertical a horizontal, relativamente cerca del punto de lanzamiento (la boquilla del atomizador); la porción restante de la trayectoria será casi horizontal.

Debido al perfil del viento (vientos disminuidos en velocidad cercanos al suelo), trayectorias en pendiente se curvarán levemente hacia abajo. Aire arrastrado es inducido por gotas de alta velocidad en el cono atomizador cerca de la boquilla. Este flujo de aire vertical arrastra efectivamente las gotas mucho más hacia abajo que su distancia de parada.

Gotas soltadas en aire quieto eventualmente caerán a su velocidad de sedimentación, que depende de su diámetro. Otros factores que afectan la trayectoria son:

- Tipo de boquilla (a través del ángulo del cono atomizador y el aire arrastrado).
- Presión del líquido (determinando la velocidad inicial).
- Altura del atomizador
- Resistencias naturales
- Turbulencia

4.1.2 Evaporación en vuelo de gotas

Una gota de agua que cae a través del aire, o flota en el aire, está sujeta a la evaporación y disminuirá en tamaño. Durante un cierto tiempo transitorio (pero relativamente corto), la gota se enfría debido a la evaporación, hasta que alcanza su *temperatura de bulbo húmedo*. Al mismo tiempo, se ha formado una delgada capa de *vapor saturado* alrededor de la gota. Como la temperatura de la gota es menor que la del aire ambiente, el calor fluye hacia la gota y "alimenta" el proceso de evaporación.

El modelo físico detrás de este proceso ha sido descrito hace varias décadas ((Marshall, 1952); (Goering, 1972); (Threadgil, 1974)). En esta sección se demostrará que el modelo físico puede simplificarse considerablemente para los aerosoles acuosos en el aire.

En 1989 (Lefebvre, 1989) se demostró que D^2 disminuye linealmente con el tiempo, para gotas de aceite calentadas, con $D > 300 \mu\text{m}$. Previamente, se mencionó (Graham-Bryce, 1980) la siguiente relación simple entre el diámetro de la gota D y la vida útil:

$$t_{vida} = \frac{D^2}{78\Delta T} \quad [\text{s}] \quad (10)$$

donde ΔT es la diferencia entre la *temperatura de bulbo seco* y bulbo húmedo. En este capítulo se demostrará que estas relaciones son demasiado simples para ser usadas como un modelo general de evaporación de las gotas de agua en el aire.

4.1.2.1 Decrecimiento del Diámetro de una gota con el Tiempo

La tasa de disminución del diámetro D de una gota esférica en aire debido a la evaporación puede ser descrita por (Threadgil, 1974):

$$\frac{dD}{dt} = \frac{-4M_l D_{v,f}}{D\rho_l RT_f} \Delta p (1 + 0,276 Re^{1/2} Sc^{1/2}) \quad [\text{s}] \quad (11)$$

donde M_l es el peso molecular del líquido de evaporación (agua: 0,018 kg / mol), ρ_l es la densidad del líquido, $D_{v,f}$ es el coeficiente de difusión promedio de las moléculas de vapor en la película/film saturada alrededor de la gota, T_f es la temperatura media absoluta en esa película, Re es el número de Reynolds, Sc es el *número de Schmidt*, Δp es la diferencia entre la

presión de vapor cerca de la gota y la de la atmósfera ambiente y R es la constante del gas (= $8.3144 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

El número de Reynolds y el número de Schmidt deberían ser ambos evaluados para la película saturada, es decir, a la temperatura T_f . El número de Reynolds se calcula a partir de la ecuación (1):

$$Re = \frac{\rho_{a,f} D v}{\eta_{a,f}} \quad [\text{Adimensional}] \quad (12)$$

donde v es la velocidad de la gota con respecto al aire circundante; $\rho_{a,f}$ es la densidad del aire a la temperatura T_f ; $\eta_{a,f}$ es la viscosidad del aire a la temperatura T_f . El número de Schmidt es una cantidad adimensional que relaciona el transporte viscoso del material al transporte difusivo; se calcula a partir de:

$$Sc = \frac{\eta_{a,f}}{\rho_{a,f} D_{v,f}} \quad [\text{Adimensional}] \quad (13)$$

Combinando ecuaciones (11), (12) y (13), y asumiendo que solo D y v son dependientes del tiempo, se obtiene que:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{-a}{D} (1 + b\sqrt{Dv}) \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (14)$$

donde a y b son constantes dependiendo únicamente de las condiciones ambientales y propiedades líquidas:

$$a = \frac{4M_l D_{v,f} \Delta p}{\rho_l R T_f} \quad \left[\frac{m^2}{s}\right] \quad (15)$$

$$b = 0.276 \left(\frac{\rho_{a,f}}{\eta_{a,f} D_{v,f}^2} \right)^{1/6} \quad \left[\frac{s^{1/2}}{m}\right] \quad (16)$$

A menudo la evaporación se describe por la llamada constante de evaporación K , definida por:

$$K = -\frac{dD^2}{dt} \quad \left[\frac{m^2}{s}\right] \quad (17)$$

Para gotas relativamente grandes ($> 300 \mu\text{m}$) los experimentos mostraron que K es aproximadamente constante ((Marshall, 1952); (Lefebvre, 1989)) dependiendo únicamente de la temperatura, humedad relativa y propiedades físicas del líquido (calor latente de

vaporización) y del aire (conductividad térmica). De hecho, proclamar que K es una constante significa que K no es dependiente del tamaño de la gota, la velocidad de la gota o el tiempo. Sin embargo, la combinación de las ecuaciones (14) y (17) da:

$$K = -2D \frac{dD}{dt} = 2a(1 + b\sqrt{Dv}) \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (18)$$

Claramente esta ecuación muestra que K no es una constante, ya que existe una dependencia del tamaño y velocidad de la gota. Puesto que D y v cambian con el tiempo, K cambiará también, lo que implica que el término evaporación 'constante' no cubre completamente su comportamiento físico real. Por lo tanto, parece más apropiado denotar K como *tasa* de evaporación en su lugar.

La mayoría de los parámetros requeridos (densidades de aire y agua, viscosidad del aire, coeficiente de difusión de vapor, temperatura absoluta) varían con la temperatura sólo ligeramente en el rango de temperaturas ambiente comunes (ver Apéndice D). Una excepción importante es la diferencia de presión de vapor Δp . Esta diferencia de presión actúa como la "fuerza motriz" para el transporte de vapor lejos de la superficie de la gota. Puede relacionarse con presiones de vapor saturado a temperatura ambiente y temperatura de bulbo húmedo (T y T_{bh} , respectivamente, véase el Apéndice C):

$$\Delta p = p_{sat,f} - p = \gamma(T - T_{bh}) \quad [Pa] \quad (19)$$

donde $p_{sat,f}$ es la presión de vapor cerca de la superficie de la gota (en el film), y p es la presión de vapor en el aire ambiente; γ es aproximadamente constante ($\sim 67 \text{ Pa / K}$). Ahora la ecuación (15) se convierte en:

$$a = \frac{4\gamma M_l D_{v,f}}{\rho_l R} \cdot \frac{\Delta T}{T_f} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (20)$$

donde $\Delta T = T - T_{bh}$.

Como muchos parámetros de las ecuaciones (16) y (20) son dependientes de la temperatura, también lo son los parámetros a y b . A 15° C ($\sim 298 \text{ K}$) y 60% de humedad relativa, $a \approx 47,5 \cdot 10^{-12} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ y $b \approx 62,0 \left[\frac{s^{1/2}}{m} \right]$. La variación en b con la temperatura es sólo pequeña. Mientras ΔT permanezca constante, la variación en a es también pequeña. A aproximadamente 15° C los cambios relativos por grado resultan ser:

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dT} \approx 0.004 \quad [1/K] \quad (21)$$

$$\frac{1}{b} \frac{db}{dT} \approx -0.003 \quad [1/K] \quad (22)$$

Esto significa que cuando la temperatura ambiente sube de 10 a 20°C, el parámetro a aumenta en 4% y b disminuye en un 3%, siempre que ΔT sea constante. Por otra parte, a es proporcional a ΔT y por lo tanto sensible a los cambios en ΔT .

4.1.2.2 Tasa de Evaporación a Velocidad de Sedimentación

La ecuación (18) da la tasa de evaporación de una gota de agua en función de su diámetro y velocidad. De acuerdo con lo visto anteriormente, todas las gotas lanzadas al aire eventualmente caerán a su velocidad de sedimentación, siempre y cuando no hayan impactado en algún momento mientras tanto. En la siguiente sección se demostrará que, con respecto a la evaporación, el tiempo entre la liberación y la sedimentación constante a menudo puede ser despreciado, y una gota en evaporación estará a su velocidad de sedimentación la mayor parte del tiempo durante su vuelo. Para tales gotas, la tasa de evaporación se puede calcular usando sus velocidades de sedimentación. La Tabla 1 muestra los valores calculados de la tasa de evaporación (de la ecuación (18)) para humedad alta, media y baja, y a temperatura ambiente constante (15°C), para las gotas que caen a través del aire a su velocidad de sedimentación. Los valores indican que K es aproximadamente proporcional a ΔT , independientemente del diámetro de la gota.

Tabla 1: Tasa de Evaporación de Gotas de Agua cayendo a su Velocidad de Sedimentación a Temperatura Ambiente 15°C, y Temperaturas de Bulbo Húmedo de 14°C, 10°C y 5°C (Humedad Relativa de 90%, 52% y 12% respectivamente)

D [μm]	v_s [$\frac{m}{s}$]	$K(\Delta T = 1^\circ C)$ [$\frac{\mu m^2}{s}$]	$K(\Delta T = 5^\circ C)$ [$\frac{\mu m^2}{s}$]	$K(\Delta T = 10^\circ C)$ [$\frac{\mu m^2}{s}$]
10	0,00300	97	479	944
20	0,0118	99	488	963
30	0,0260	101	499	986

40	0,0452	104	513	1013
50	0,0689	107	528	1043
60	0,0965	110	544	1075
70	0,128	113	561	1109
80	0,162	117	579	1145
90	0,198	121	598	1181
100	0,237	124	617	1219
150	0,455	144	716	1418
200	0,692	165	819	1622
250	0,935	186	923	1829
300	1,18	207	1027	2035
400	1,64	247	1226	2433
500	2,07	286	1419	2816
750	3,05	378	1879	3732
1000	3,89	464	2307	4583

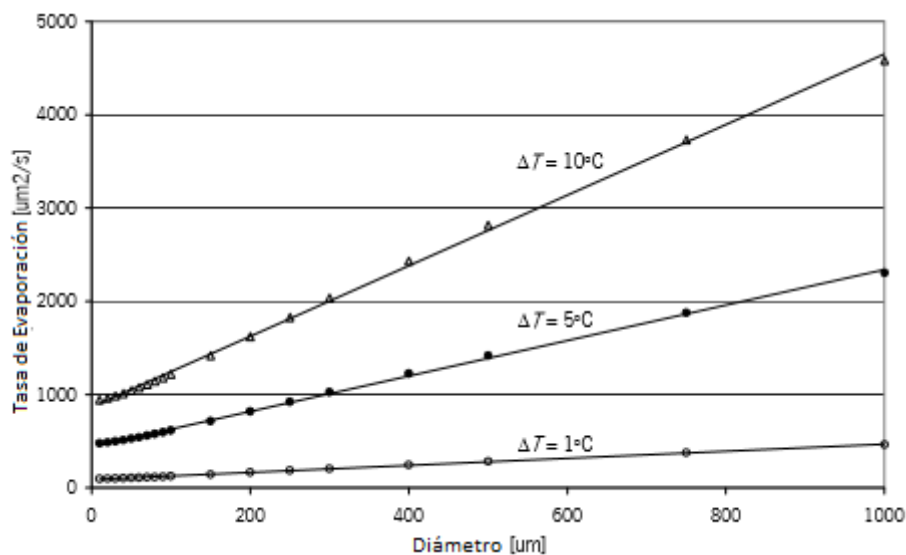


Figura 9: Tasa de evaporación K para gotas moviéndose a su velocidad de sedimentación. Temperatura ambiente 15°C , Temperatura de Bulbo Húmedo 14, 10 y 5°C (HR 90, % 52% y 12% respectivamente). Puntos: datos computados (ver Tabla 1); Líneas: regresión lineal.

La Figura 9 muestra una gráfica de K como una función del diámetro de la gota, usando los valores de la Tabla 1. Las líneas de regresión lineal indican que K aumenta casi linealmente con diámetro creciente. Aparentemente la ecuación no lineal (18) puede ser aproximada por una ecuación lineal. Puesto que los factores a y b no dependen del diámetro de la gota, la dependencia del diámetro debe estar implícita únicamente por la raíz cuadrada del diámetro y la velocidad de sedimentación. En efecto, se puede demostrar empíricamente que esta raíz cuadrada se aproxima por la siguiente ecuación lineal:

$$\sqrt{Dv_s} \approx r_0 D + s_0 \quad \left[\frac{m}{s^{1/2}} \right] \quad (23)$$

$$\text{Con } r_0 \approx 64,65 \left[\frac{1}{s^{1/2}} \right] \text{ y } s_0 \approx -1,117 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m}{s^{1/2}} \right]. \quad (R^2=0.999).$$

Reescribiendo la ecuación (18) nos da la siguiente aproximación lineal:

$$K = q_0 \Delta T (1 + q_1 D) \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (24)$$

donde:

$$q_0 = \frac{2a}{\Delta T} (1 + b s_0) \quad \left[\frac{m^2}{sK} \right] \quad (25)$$

$$q_1 = \frac{b r_0}{1 + b s_0} \quad \left[\frac{1}{m} \right] \quad (26)$$

Dado que a y b dependen ligeramente de la temperatura, también lo hacen q_0 y q_1 . En la Tabla 2 se muestran los valores de q_0 y q_1 a temperaturas ambiente 10, 15 y 20°C, para alta, media y baja humedad (90%, 52% y 22% respectivamente). Mientras q_0 aumenta ligeramente con el aumento de la temperatura y la humedad, para q_1 es exactamente lo contrario. Por lo tanto, estos parámetros tienden a compensarse entre sí con respecto a su efecto sobre K . Por lo tanto, se puede esperar que mientras ΔT permanezca constante, la tasa de evaporación no debería cambiar mucho. De hecho, la Figura 10 muestra que la tasa de evaporación apenas varía con la temperatura ambiente, cuando ΔT se fija a 5°C. Se debe tener en cuenta que RH no es constante en estos casos y tiene valores de rango medio, pero esto no es un prerrequisito.

Tabla 2: Parámetros q_0 y q_1 en aproximación lineal de tasa de evaporación de gotas cayendo su velocidad de sedimentación, a tres temperaturas ambientes y para 3 humedades distintas.

T [°C]	RH [%]	ΔT [°C]	q_0 [$\frac{\mu m^2}{sK}$]	q_1 [$\frac{1}{\mu m}$]
10	90	0,8	87,18	0,00436
	50	4,4	86,29	0,00439
	20	7,4	85,56	0,00441
15	90	1,0	89,14	0,00428
	50	5,2	88,07	0,00431
	20	8,9	87,16	0,00434
20	90	1,1	91,10	0,00421
	50	6,1	89,84	0,00425
	20	10,6	88,74	0,00428

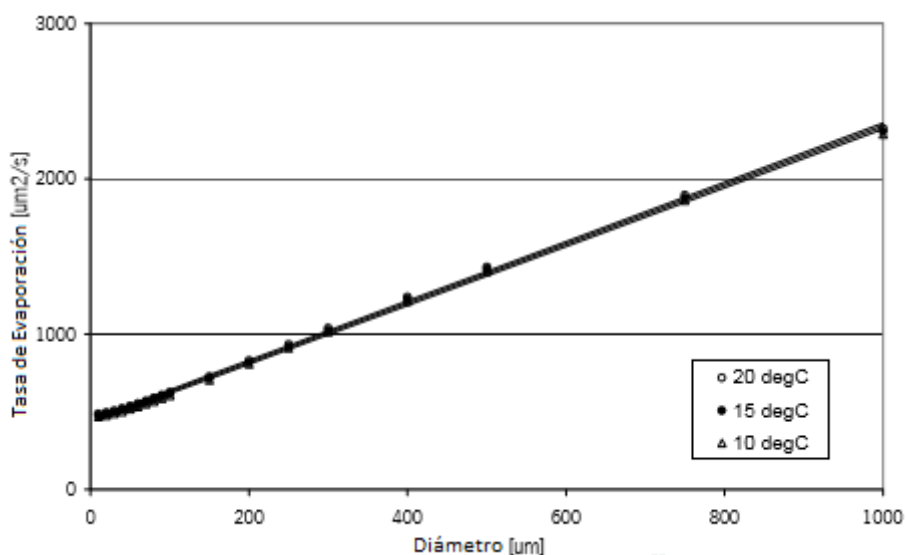


Figura 10: Tasa de evaporación K para gotas moviéndose a velocidad de sedimentación. Temperatura ambiente 15°C, $\Delta T = 5^\circ C$ constante (RH 52%). Puntos: computado directamente (Ecuación (18)); línea: aproximación lineal (Ecuación (24)).

Utilizando estos conceptos y fórmulas, en la sección siguiente resolveremos las ecuaciones diferenciales y las demás incógnitas que aparecieron para lograr modelar el sistema correctamente. Utilizaremos métodos numéricos para lograr su resolución a partir del entorno de cálculo técnico MATLAB®.

4.2 Modelado

Para lograr modelar nuestro sistema, debemos resolver las ecuaciones expresadas anteriormente. El inconveniente surge al darnos cuenta que varias de las ecuaciones que vimos no poseen solución analítica. Por lo tanto, para poder resolver dichas ecuaciones, debemos recurrir al cálculo numérico.

Según cual sea la naturaleza de la ecuación (no lineal, diferencial de primer orden, diferencial de orden superior, entre otras), emplearemos distintos métodos. En concreto, emplearemos tres métodos distintos. Uno puramente iterativo, para resolver aquellas ecuaciones donde se necesita el valor de salida para calcular el valor de entrada, en donde este último surge del valor de salida, y así, necesitando un modelo recurrente para su solución, conjuntamente con un valor *semilla*. El segundo método será el de Bisección, el cual es usado para resolver ecuaciones no lineales en donde lo que se busca, es localizar la raíz. El tercer y último método es el de Euler, usado para resolver ecuaciones diferenciales de primer orden (ODE) con valores iniciales predeterminados.

Con el objetivo de facilitar la lectura y comprensión del presente trabajo, se agregarán las técnicas empleadas a cada incógnita en particular bajo el Apéndice B. Ahora, nos limitaremos a discutir el proceso de variación del diámetro de una gota utilizando los resultados de las ecuaciones resueltas del apéndice anteriormente mencionado, conjuntamente con los cambios que produce en la temperatura ambiente como también en la humedad relativa del aire. Otro dato importante que sacaremos de este análisis será el sumidero que produce esta evaporación, o en otras palabras que serán traducidas al lenguaje OpenFOAM® más adelante, la cantidad potencia por metro cúbico necesaria para llevar a cabo este proceso, ya que este era nuestro objetivo inicial, encontrar la semejanza entre el sumidero térmico y la torre de enfriamiento.

Para lograr el modelado más certero posible, se decidió seguir a una partícula de agua en un medio gaseoso (en este caso, el aire), suponiendo una corriente de aire descendente de velocidad V . Para lograr esto, se optó por una discretización espacial, lo cual en nuestro caso se refiere a longitudinal, con un determinado ancho A . A continuación, se ilustrará a dicha discretización, y luego, se la explicará.

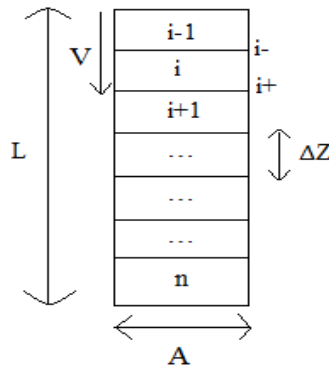


Figura 11: Discretización del Dominio

La Figura 11 ilustra la división del dominio unidimensional en porciones constantes denominadas ΔZ , de largo total L . El índice i se refiere al *centro de una celda genérica*, siendo $i+1$ el centro de la celda inmediatamente superior, e $i-1$ la inmediatamente inferior. Los índices $i+$ e $i-$ refieren a la *cara entre las celdas* i e $i+1$, y la cara entre la celda i e $i-1$, respectivamente.

De esta manera logramos dividir el dominio en celdas de longitud constante, y por lo tanto área y volumen constante. Al dejar el espacio constante lo que nos variará será el espacio temporal, es decir, la cantidad de tiempo que transcurre entre que la gota pase del centro de una celda, al centro la celda inmediata siguiente. Esto quiere decir que, en vez de tratar con escalares, trataremos a la longitud, el tiempo, la temperatura, la humedad relativa y a la potencia, como vectores.

Antes de avanzar, debemos dar una definición. Existen variables que son de entrada al sistema de ecuaciones, es decir que no dependen directamente del cálculo a realizar, sino que se pueden suministrar previamente. En el modelado, 9 variables fueron elegidas como parámetros:

- La temperatura ambiente (T);
- La humedad relativa ($H.R$);
- La velocidad del viento en dirección perpendicular al plano (V);

- El diámetro inicial de cada gota (D_0);
- La cantidad de gotas por metro cúbico (n'');
- El área de la sección transversal del dispositivo (A);
- El largo del dispositivo (L);
- La cantidad de celdas;
- El tamaño de cada división de celda (ΔZ).

A continuación, se plantearán las siguientes preguntas: ¿Cuánto tarda una gota en evaporarse? ¿A qué altura se evapora? ¿Cómo varía la temperatura ambiente con cada gota evaporada? ¿Cómo influye esto en la humedad relativa? Y, por último, ¿Cuánta potencia extrae la gota del aire para llevar a cabo este proceso?

4.2.1 Variación del Diámetro

En el Apéndice B se explicó cómo se logró resolver la tasa de evaporación, pero esto por sí solo no nos dice en cuanto tiempo la gota desaparece, sino a que ritmo lo hace, dado cada condición inicial. Estas condiciones iniciales variarán de celda a celda, dado la forma en que discretizamos. Pero antes de avanzar, debemos descubrir cuánto tardará cada gota en pasar al centro de la celda siguiente. Esto se resuelve utilizando la velocidad total de la gota:

$$V_{tot} = V + V_s \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (27)$$

Es decir, la velocidad total de una gota será la suma de la velocidad vertical del viento y su velocidad de sedimentación. Juntando esta velocidad, la cual depende del diámetro de la gota, con la discretización constante, podemos obtener el tiempo que tardará la gota entre celda y celda:

$$\Delta t = \frac{\Delta Z}{-V_{tot}} \quad [s] \quad (28)$$

El signo negativo hace referencia a que como nuestro eje de referencia es con positivo hacia arriba, la velocidad total dará signo negativo, dado que la gota cae hacia el suelo, por lo que de esta manera el tiempo entre celda nos retorna un valor positivo.

Como ya se mencionó anteriormente, existen variables globales que serán suministradas previamente para poder realizar los cálculos, pero al tratarse de magnitudes escalares, según

convenga, deberán ser almacenadas en un vector de tantos elementos como caras que posea la discretización ($\frac{L}{\Delta Z} + 1$, o $n+1$). Esto será el caso de la temperatura ambiente y de la humedad relativa. La razón es que el diámetro variará de celda a celda por proceso evaporativo, es decir, la cantidad de energía que recibe la gota para la evaporación es igual a la cantidad de energía que pierde el aire, lo cual se traduce en una disminución de la temperatura ambiente en cada celda (este concepto se expandirá más en la siguiente subsección). La misma explicación se puede dar, en principio, a la humedad relativa, la cantidad de agua perdida (evaporada) entre celda y celda debe ser igual a la cantidad de agua que recibe el aire (al igual que en el caso de la temperatura ambiente, este principio se explicará más a fondo en la sección que sigue).

Para calcular el diámetro de la gota en cada celda, debemos partir del valor inicial del diámetro en esa celda, y restarle lo que se evaporó, dándonos la siguiente expresión:

$$D = D_0 + \frac{dD}{dt} dt \quad [m] \quad (29)$$

Si bien en la expresión aparece una suma y anteriormente se dijo “restar lo evaporado”, al ser la tasa de evaporación K o $\frac{dD}{dt}$ negativo, esto provocará una sustracción.

Entonces, el cálculo de la variación del diámetro seguirá 4 pasos fundamentales:

1. Cálculo de la tasa de evaporación en el centro de la celda dada la temperatura ambiente, la humedad relativa y el diámetro la gota en esa celda;
2. Cálculo de la velocidad de Sedimentación
3. Cálculo del tiempo entre centro de celdas;
4. Cálculo del nuevo diámetro.

Esto se deberá realizar desde la primera celda, hasta la última. El resultado será un vector de diámetros para cada celda del dominio.

El código que logra resolver dicho proceso se encuentra en el Apéndice F.

4.2.2 Variación de la Temperatura Ambiente y del Sumidero

Los cambios de la temperatura ambiente y del sumidero de calor se basan en la conservación de la energía. Para poder describir esta igualdad, debemos antes introducir tres fórmulas.

La primera es el flujo másico del aire:

$$\dot{m}_a = VA\rho_a \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (30)$$

Luego está el flujo másico del líquido:

$$\dot{m}_{l,f} = n'''_f AV_{tot,f} \rho_l Vol_f \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (31)$$

siendo n'''_f la cantidad de gotas por metro cúbico ($\left[\frac{1}{m^3} \right]$) en la cara de la celda, A al área del dispositivo y Vol_f el volumen de la gota en la cara de la celda.

La última de las tres ecuaciones es una igualdad de frecuencia, la cual sostiene que la cantidad de gotas por metro cúbico (en la cara de una celda) circulando a su velocidad total (en la cara de la celda) a través de la sección transversal se mantendrá constante, es decir:

$$n'''_{f,i-} V_{tot,f,i-} A = n'''_{f,i+} V_{tot,f,i+} A \left[\frac{1}{s} \right] \quad (32)$$

De esta forma podemos introducir la ecuación de conservación de energía:

$$\dot{m}_a C_{p,a} (T_{i+} - T_{i-}) = (\dot{m}_{l,i-} - \dot{m}_{l,i+}) C_{l,l} [W] \quad (33)$$

siendo $C_{p,a}$ el calor específico del aire ($\left[\frac{J}{KgK} \right]$), y $C_{l,l}$ el calor latente de evaporación del líquido (agua) ($\left[\frac{J}{Kg} \right]$). Los subíndices $i+$ e $i-$ se refieren al valor de esas magnitudes en las caras de las celdas (ver Figura 11).

La diferencia de flujos másicos del líquido se puede expresar como una diferencia volumétrica de la siguiente manera:

$$(\dot{m}_{l,i-} - \dot{m}_{l,i+}) = \rho_l A n''' V_{tot0} \left(\frac{Vol_{l,i-1} - Vol_{l,i+1}}{2} \right) \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (34)$$

Notar que el producto $An'''V_{tot}$ no lleva referencia respecto a la cara o centro de celda. Esto es por la ecuación (32) que sostiene que, si bien esos valores cambian de celda a celda, su producto se mantiene constante a lo largo del dominio, razón por la que se utiliza el valor inicial de dicho producto. También se debe observar que la resta en sí es un promedio de la diferencia de los volúmenes de la celda anterior con la subsiguiente (notar Figura 11)).

La incógnita celda a celda será T_{i+} , es decir la temperatura ambiente en la cara de la celda siguiente. Como el dato que se traslada celda a celda es el volumen, la variación de la temperatura ambiente recibe como parámetro principal al vector volumen, el cual es originado

a partir del vector de diámetros calculado en la sección anterior (sabiendo que el volumen de una esfera es $\frac{\pi D^3}{6}$).

De manera similar, el concepto se puede extender al sumidero de calor por celda, siendo su cálculo el siguiente:

$$S_i = \rho_l n''' V_{tot0} C_{l,l} (Vol_{l,i-1} - Vol_{l,i+1}) \frac{1}{\Delta Z} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (35)$$

Se calcula la potencia por unidad de volumen porque ésta es solicitada por OpenFOAM® para realizar la simulación.

Se expondrá el código empleado en el Apéndice F.

4.2.3 Variación de Humedad Relativa

Por último, debemos resolver el proceso de aumento de humedad relativa. Esto se produce porque con cada porción de agua evaporada en una gota, el aire se humedece, es decir, absorbe esta agua evaporada. La influencia del aumento de la humedad relativa se da en que, a medida que aumente, disminuirá la variación del diámetro de la gota producto de la evaporación, ya que el aire podrá absorber menos agua.

Traducido en una ecuación de continuidad, es decir, conservación del caudal másico, esto es de la siguiente forma:

$$A(V_{tot,i+} m'''_{l,i+} - V_{tot,i+} m'''_{l,i-}) = (Vol_{i+1} - Vol_{i-1}) A V_{tot} n''' \rho_l \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (36)$$

donde nuestra incógnita principal será $m'''_{l,i+}$, es decir, la cantidad de kilogramos de líquido por metro cúbico en la cara inferior de la celda.

Con este resultado podemos proceder a calcular la cantidad de moles por metro cúbico de la siguiente forma:

$$n'''_{l,i+} = \frac{1000 m'''_{l,i+}}{M_l} \left[\frac{mol}{m^3} \right] \quad (37)$$

A partir de este valor, utilizando la ley de los gases ideales, podemos calcular la presión de vapor como:

$$P_{vap,i+} = n'''_{l,i+} R T_k \quad (38)$$

Siendo R la constante de gases universal ($R = 8,3144 \frac{m^3 Pa}{MolK}$) y T_k la temperatura ambiente expresada en grados Kelvin.

Utilizando el resultado de la ecuación (66) referida a la presión de vapor saturado, podemos hallar la humedad relativa en la cara de la celda como:

$$H_{rel} = 100 \frac{P_{vap}}{P_{vap,sat}} \quad [\%] \quad (39)$$

Lo expresado anteriormente pasado a lenguaje de programación para MATLAB® se presenta en el Apéndice F.

4.2.4 Convergencia

Con los 4 procesos anteriores, estamos en condiciones de iterar el modelo hasta que logre converger, si es que es posible. El proceso se torna iterativo porque partimos de la humedad relativa y la temperatura ambiente del momento inicial, como también del diámetro inicial de la gota. A medida que la gota avanza por las celdas, disminuye su diámetro por el proceso de evaporación, esto provoca una disminución de la temperatura ambiente, causando una desaceleración en la tasa de evaporación. Al mismo tiempo, esto trae aparejado que la humedad relativa aumenta con cada evaporación celda a celda, lo cual también ralentiza el proceso, ya que el aire cada vez admite menos agua, hasta llegar a un plausible 100% de humedad relativa, provocando la imposibilidad de seguir el proceso evaporativo.

El recorrido de ir actualizando el valor celda a celda de los distintos procesos e ir guardando el resultado en sus respectivos vectores se hará por 15 veces en total. Los resultados posibles son: sistema oscilatorio, sistema divergente o un sistema convergente. Afortunadamente para el proyecto, el proceso logró converger a un valor único.

Se detallará el código empleado para lograr dicha convergencia en el Apéndice F.

4.2.5 Resultados del Modelado

El modelo en cuestión recibe ciertos parámetros iniciales que dependen de la ubicación geográfica (como temperatura ambiente, humedad relativa), de aspectos físicos del dispositivo

o torre de enfriamiento (como la sección transversal, el diámetro inicial de gota, etc.), entre otros. Dichos valores se explicitarán en el Apéndice A.

Respecto a la variación del diámetro, se ilustrará a continuación los gráficos de su convergencia:

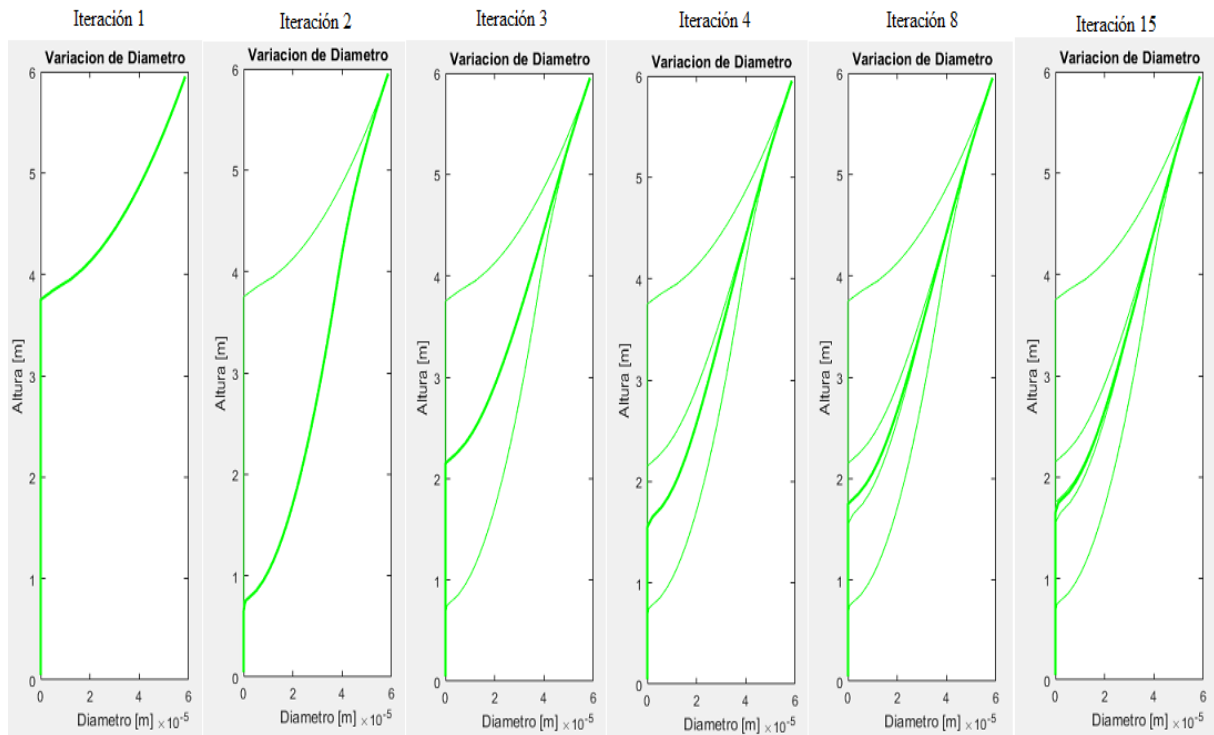


Figura 12: Convergencia la Variación del Diámetro, con $D_0=6 \cdot 10^{-6}$ m. Línea pronunciada es el resultado de la última iteración realizada.

Como se puede apreciar en la Figura 12, los cambios diametrales convergen luego de aproximadamente 8 iteraciones, por lo que hacer 15 en total es simplemente un resguardo. El corte con el eje de ordenadas quiere decir que la gota llegó a $D=0$ m, es decir, se evaporó completamente. Esta es una condición necesaria para lograr una sensación de confort en el usuario de la aplicación ya que a alturas menores a 2m (lo cual es la altura razonable por donde circula el aire que uno siente al caminar) las gotas necesitan estar evaporadas para impedir el contacto directo con agua, y en su lugar, sentir una brisa.

Relativo a los cambios en la temperatura ambiente, los resultados de convergencia son los siguientes:

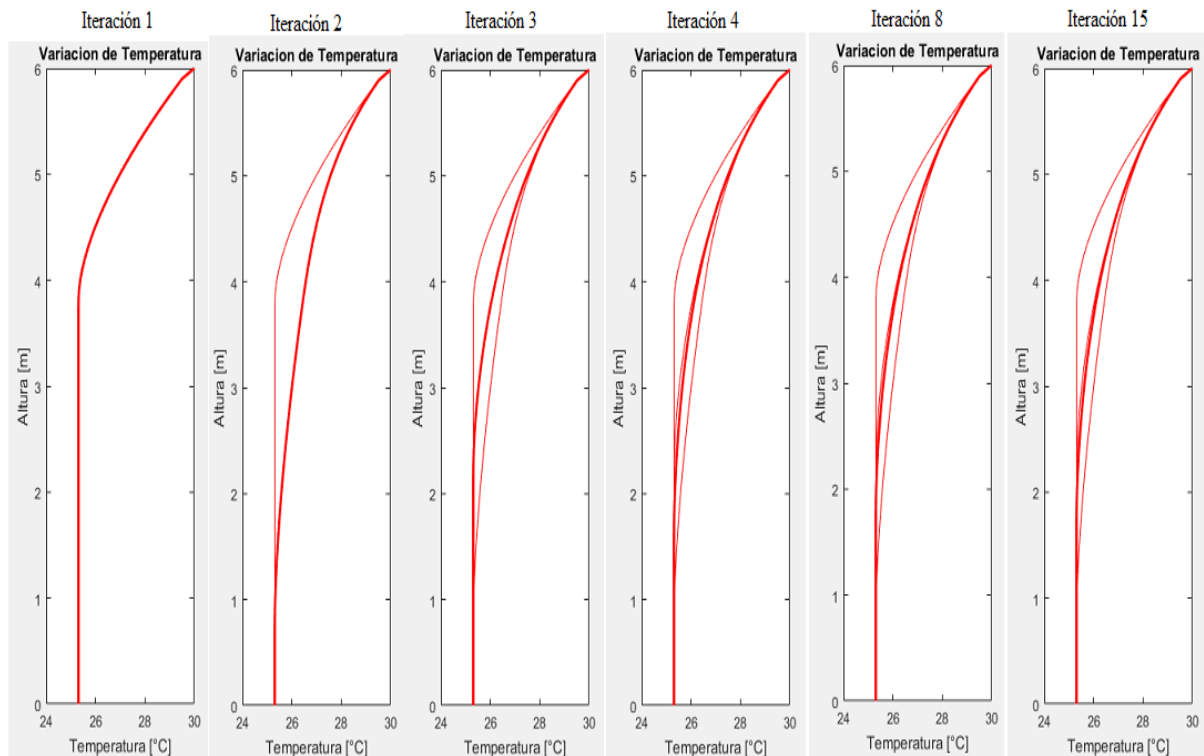


Figura 13: Convergencia de la Temperatura Ambiente, con $T_0=30^\circ\text{C}$. Línea pronunciada es el resultado de la última iteración realizada.

La convergencia relativo a la temperatura ambiente se da antes que en el diámetro, aproximadamente a las 5 iteraciones. El último gráfico de la Figura 13 muestra que se logra disminuir la temperatura en $4,7^\circ\text{C}$ aproximadamente. Notar que la temperatura ambiente no disminuye pasado los 2 metros, esto se debe a que la gota ya se encuentra evaporada, como describimos anteriormente, por lo que no hay más transferencia de energía entre el aire ambiente y las gotas (ya evaporadas) pasado ese punto.

Respecto a la humedad relativa, ésta también logra converger antes de las 15 iteraciones. Los resultados son los siguientes:

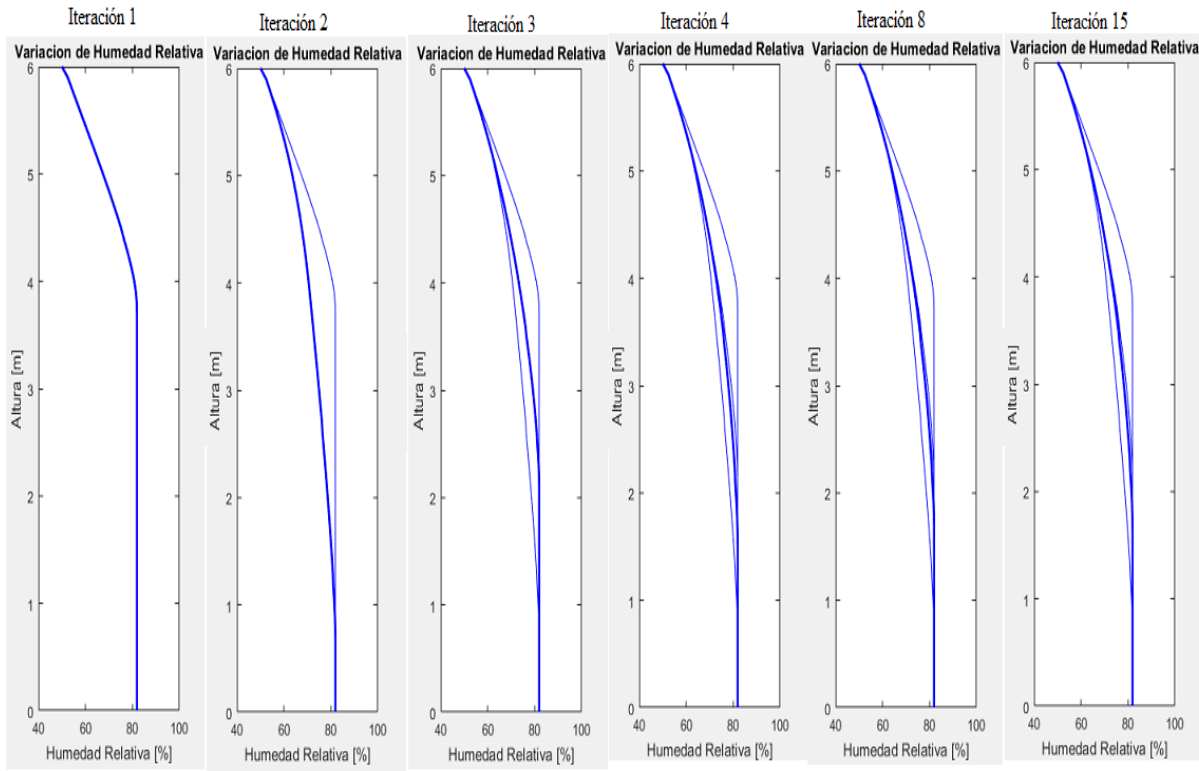


Figura 14: Convergencia de la Humedad Relativa, con $H_{rel0}=50\%$. Línea pronunciada es el resultado de la última iteración realizada.

Se puede observar fácilmente que la humedad relativa logra converger a un vector de valores mucho antes que las demás variables. La razón de esto se encuentra en la propia naturaleza lineal del cálculo de la humedad relativa. Al igual que con la temperatura ambiente, se variación se ralentiza al pasar los 2 metros, dado que no existe más intercambio de masa de agua entre el aire y las gotas, lo cual provocaba los cambios en la humedad. El aumento de la humedad relativa es de aproximadamente 32%, número que es considerable en magnitud. Esto puede ser tanto deseado como no querido. En el caso de ciudades con humedades relativas bajas, un aumento del orden del 30% en la humedad relativa puede significar bienestar, mientras que si partimos de 50% como lo hicimos en nuestro caso (una humedad relativamente alta para un día de calor en una zona seca), llegar al rango del 80% puede provocar aparición de hongos, sensaciones físicas indeseadas, y demás.

Por último, tenemos al sumidero de calor. Es decir, a la potencia necesaria para alimentar el proceso de evaporación, por unidad de volumen. La razón por la que la potencia

volumétrica es requerida es que ésta es la que exige el simulador OpenFOAM® para poder realizar los cálculos necesarios. En la figura siguiente se podrá apreciar la convergencia iteración a iteración:

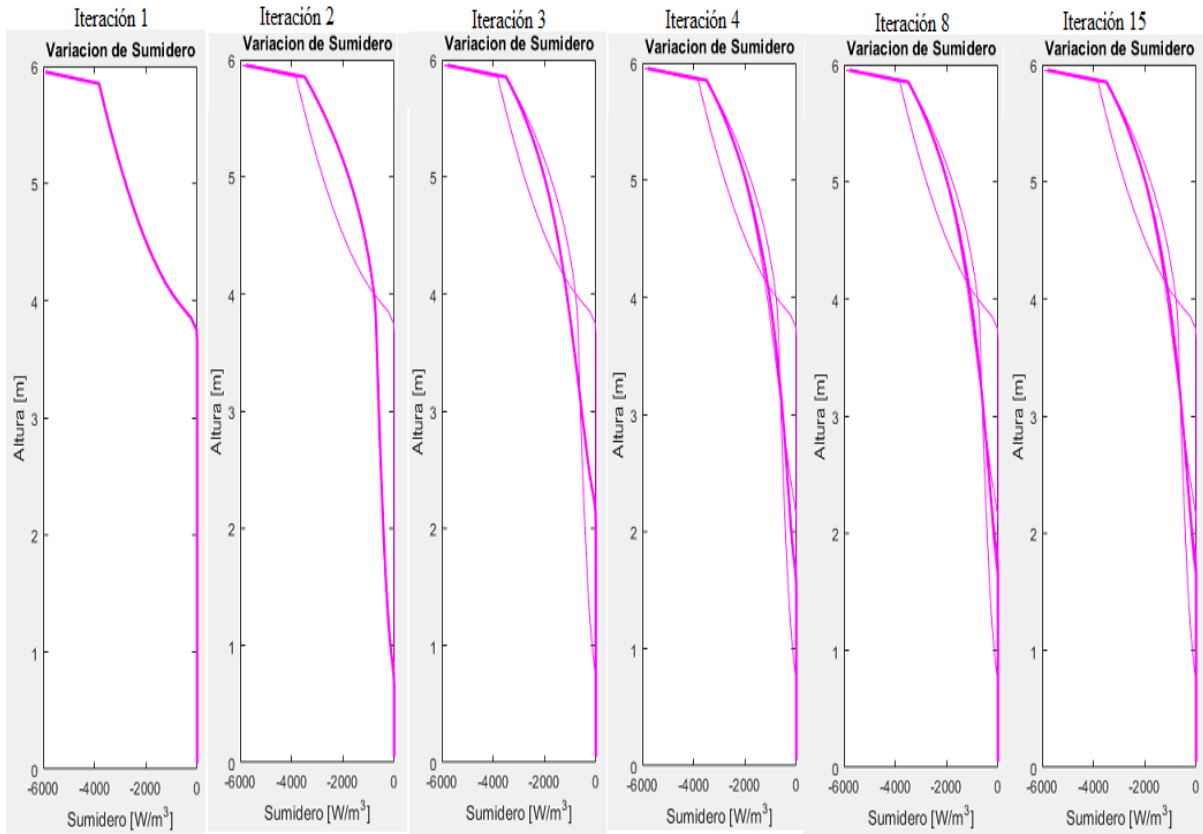


Figura 15: Convergencia del Sumidero Volumétrico, con $S_0=5,76 \text{ KW/m}^3$. Línea pronunciada es el resultado de la última iteración realizada.

El cambio brusco en la pendiente del sumidero se debe a la forma de cálculo, siendo más suave a medida que se avanza en su análisis. Notamos que, para iniciar el proceso, se requieren de aproximadamente 5760 W/m^3 para alimentar el proceso de evaporación. La razón del signo negativo del sumidero es que este aporte retira calor del ambiente, causando la disminución de la temperatura en lugar de su aumento.

Dispuesto lado a lado, los resultados finales son los siguientes:

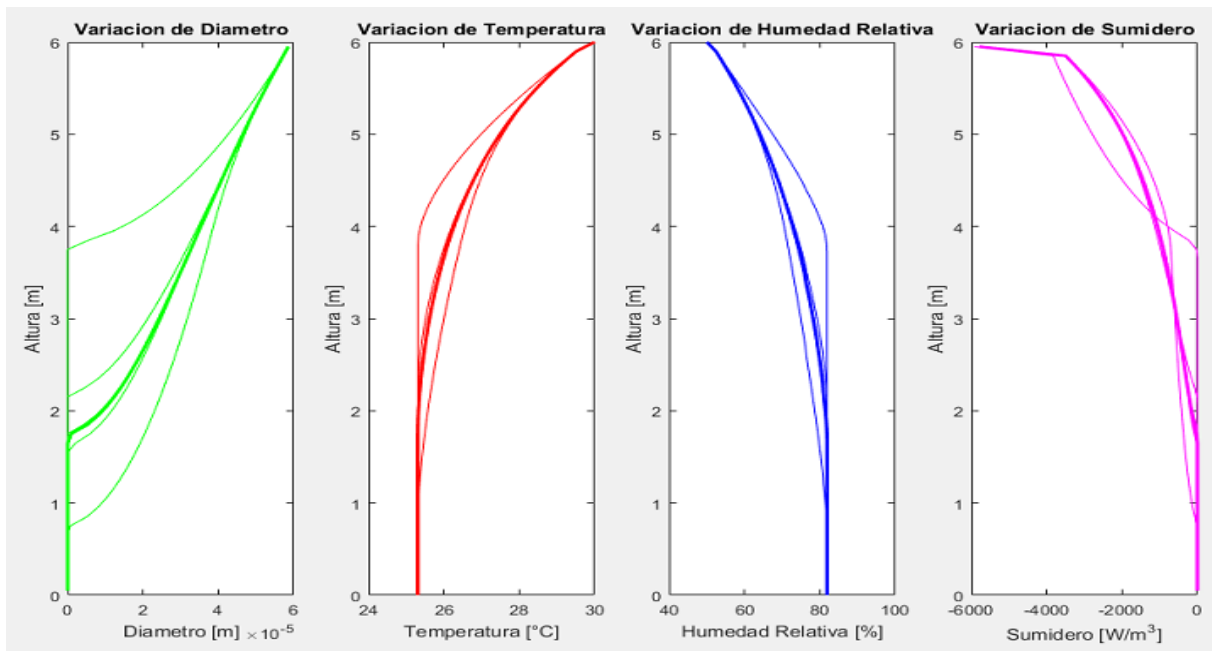


Figura 16: Convergencia final de procesos luego de 15 iteraciones.

Este último de los cuatro gráficos es de particular interés, ya que es el sumidero que representa la potencia extraída por el agua al aire. Esto nos servirá para la simulación del fenómeno, aunque habrá que modificarlo dividiéndolo por un valor específico (en esta simulación en particular, 1225 veces para ser exacto). Este número es el resultado del producto entre la densidad del fluido (aire en este caso) con su calor específico. Esto nos devuelve una tasa de cambio de temperatura (K/s). Esta tasa es usada como parámetro de entrada para el sumidero que se aplicará en la simulación, lo cual se desarrollará en la sección siguiente.

4.3 Simulación

En la unidad anterior nos ocupamos del modelado del sistema. Es decir, la representación matemática/física del proceso de evaporación unidimensional a través de métodos numéricos. Ahora nos centraremos en la simulación, es decir, la imitación del proceso modelado en un entorno similar al de la vida real, utilizando los resultados del modelo creado anteriormente como parámetros de entrada, para sacar conclusiones referidas a su comportamiento real (o lo más cercano posible).

Para concretar esto, antes debemos realizar tres cosas. La primera es la creación de la estructura física sobre la cual se realizará la simulación; la segunda es la elección apropiada del solver a utilizar para resolver las distintas ecuaciones que se mencionarán más adelante, y la última es el traspaso de los resultados obtenidos en el modelado a datos comprensibles por nuestro simulador.

El análisis se hará en base a un sistema similar al del siguiente esquema:

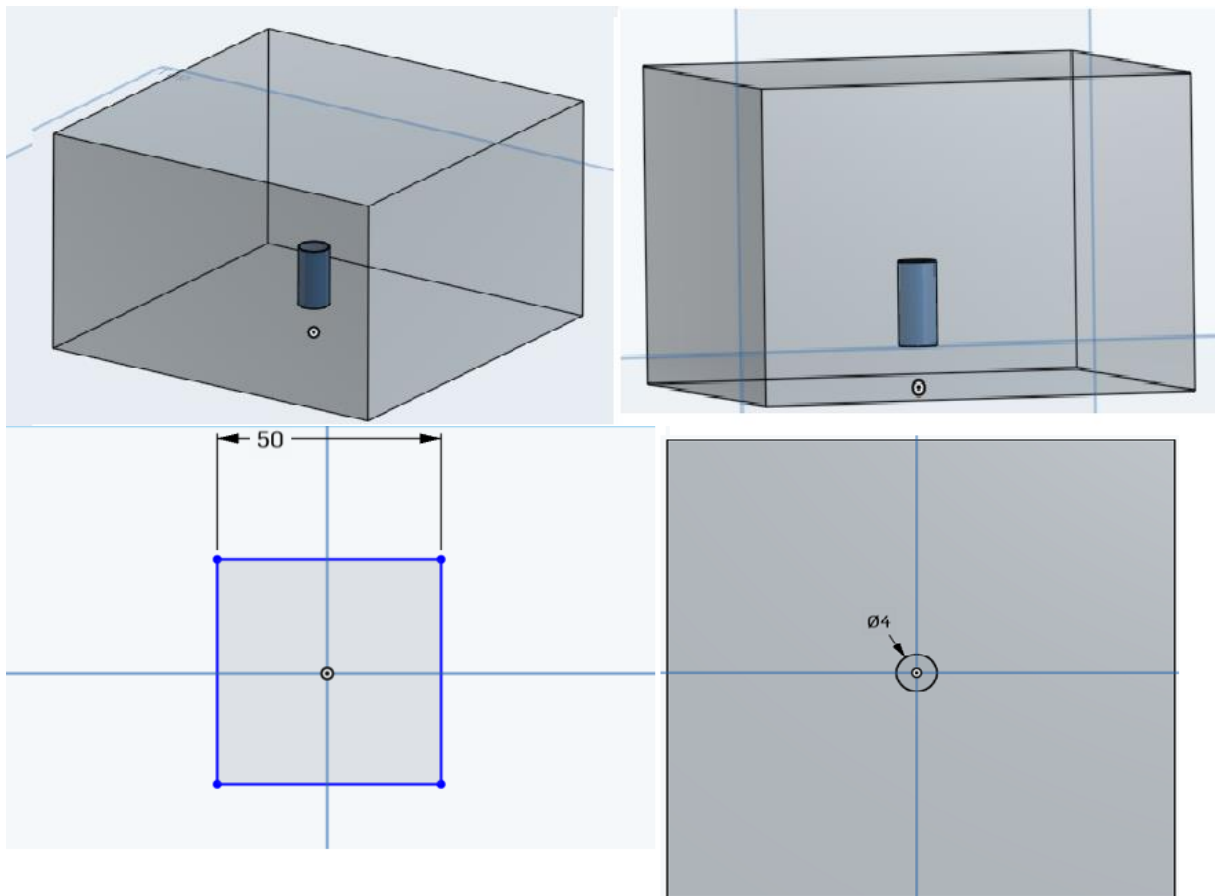


Figura 17: Esquema básico del sistema, conjuntamente con cotas.

Se trata de un prisma representando al patio de UADE, de 50m de largo y ancho, y una altura de 20m. El cilindro representa el dispositivo (torre de enfriamiento), con un diámetro de 4m, un largo de 6 metros y se ubica a 4 metros del suelo. El esquema anterior fue creado utilizando el CAD online Onshape®.

4.3.1 Estructura y Mesh

El proceso de *meshing* consiste en la generación de una representación discretizada de la geometría del sistema que se intenta resolver. Esencialmente, divide el espacio en elementos (o celdas o zonas) sobre los cuales se pueden aproximar las ecuaciones. Los límites de las zonas pueden ser libres para crear zonas mejor configuradas computacionalmente, o se pueden fijar para representar los límites internos o externos dentro de un modelo. El fin entonces es obtener un resultado visual respecto al comportamiento del sistema, pudiendo así visualizar gradientes de presión, cambios de temperaturas, fluctuaciones en las velocidades, entre otras cosas.

El método utilizado por OpenFOAM se denomina método de volúmenes finitos, y está basado principalmente en el concepto de volumen de control. La ecuación general de transporte será utilizada como punto de partida:

$$\frac{\partial(\rho B)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho B u) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla B) + S_B \quad (40)$$

donde B , es una propiedad del fluido, Γ es el coeficiente de difusión y S es una fuente. Si se eliminan los términos convectivos y transitorios, entonces se obtiene la forma más simple del proceso de transporte:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla B) + S_B = 0 \quad (41)$$

Y en una dimensión:

$$\frac{d}{dx} \cdot \left(\Gamma \frac{dB}{dx} \right) + S_b = 0 \quad (42)$$

El primer paso en el método de volúmenes finitos es dividir el dominio en volúmenes de control como se muestra a continuación:

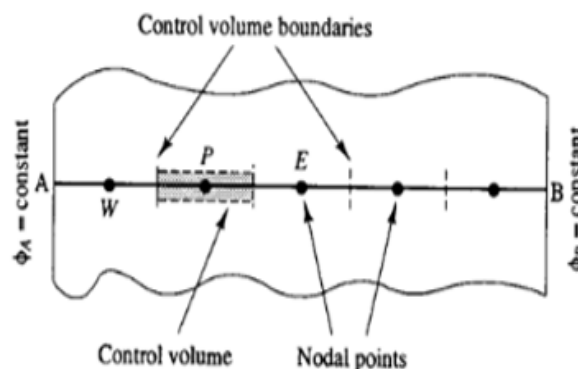


Figura 18: Volumen de Control (Versteeg, 1995)

Se colocan una cierta cantidad de celdas en el espacio entre el punto A y B. Las caras o bordes de cada volumen de control se posicionan equidistante a dos nodos adyacentes. A continuación, se muestra la convención de nomenclaturas que se utilizarán más adelante:

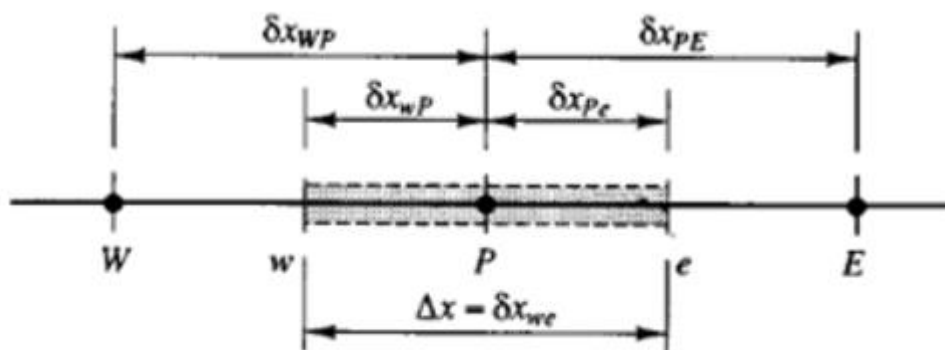


Figura 19: Nomenclaturas de un volumen de control (Versteeg, 1995)

Un nodo en general se identifica como P, y sus nodos vecinos W (west, izquierda) y E (east, derecha). La cara izquierda del volumen de control es w, y la derecha e. La distancia entre los nodos W y P, y entre P y E, se identifican como δx_{WP} y δx_{PE} respectivamente. De igual modo las distancias entre la cara w y el nodo P, y el nodo P con la cara e, se denominan δx_{wP} y δx_{Pe} . Por último, el ancho del volumen de control es $\Delta x = \delta x_{we}$.

El paso clave en el método de volúmenes finitos es la integración de las ecuaciones sobre el volumen de control y usar el Teorema de Gauss para poder obtener una ecuación discretizada. Para el volumen de control definido anteriormente la integración es como sigue:

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dt} \left(\Gamma \frac{dB}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S dV = \left(\Gamma A \frac{dB}{dx} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{dB}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (43)$$

donde A es la sección transversal de la cara del volumen de control, ΔV es el volumen, y \bar{S} es el valor promedio de la fuente S en el volumen de control. La ecuación (43) tiene una clara interpretación física: el flujo difusivo que sale por la cara derecha menos el flujo difusivo que entra por la cara izquierda es igual al flujo generado.

Es necesario obtener los valores de B y Γ , para poder obtener la ecuación buscada. Para ello se realiza una aproximación lineal, denominada diferencias centrales:

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_W + \Gamma_P}{2} \quad (44)$$

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_P + \Gamma_E}{2} \quad (45)$$

Entonces,

$$\left(\Gamma A \frac{dB}{dx}\right)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{B_E - B_P}{\delta x_{PE}}\right) \quad (46)$$

$$\left(\Gamma A \frac{dB}{dx}\right)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{B_P - B_W}{\delta x_{WP}}\right) \quad (47)$$

Además, linealizando la función \bar{S} , siendo S_u el término constante (Salas):

$$\bar{S}\Delta V = S_u + S_p B_p \quad (48)$$

Sustituyendo,

$$\Gamma_e A_e \left(\frac{B_E - B_P}{\delta x_{PE}}\right) - \Gamma_w A_w \left(\frac{B_P - B_W}{\delta x_{WP}}\right) + (S_u + S_p B_p) = 0 \quad (49)$$

$$\left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w - S_p\right) B_p = \left(\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w\right) B_W + \left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e\right) B_E + S_u \quad (50)$$

Para facilitar, se denomina:

$$a_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w \quad (51)$$

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e a_p = a_w + a_E - S_p \quad (52)$$

Entonces se llega a la ecuación buscada:

$$a_p B_p = A_w B_W + A_E B_E + S_u \quad (53)$$

La ecuación anterior se resuelve en todos los nodos dispuestos anteriormente en el dominio del problema. Para aquellos volúmenes de control que son adyacentes al borde del dominio, se modifica la ecuación para incorporar las condiciones de borde. El sistema de ecuaciones algebraicas lineales resultante es resuelto para obtener el valor de la propiedad evaluada B en cada centro de celda. Es sencillo ahora obtener las mismas ecuaciones para un sistema tridimensional.

Sintéticamente,

$$a_p B_p = A_w B_W + A_E B_E + A_S B_S + A_N B_N + A_B B_B + A_T B_T + S_u \quad (54)$$

En la introducción del presente trabajo se informó que la simulación se realizará sobre el patio de UADE, sin embargo, la recreación exacta del yard es tanto innecesaria como ineficiente. Con el fin de reducir tiempos de cálculo (los cuales aumentan exponencialmente con el aumento de la dificultad de la estructura a simular), se realizarán ciertas simplificaciones.

El patio puede interpretarse entonces como una caja, con las dimensiones mencionadas anteriormente. Es importante resaltar que el origen del sistema de coordenadas se encuentra en el centro de la cara inferior del cubo. Esto es útil ya que más adelante nos permitirá realizar ciertas simplificaciones si desestimamos lo que ocurren en zonas lejanas al origen.

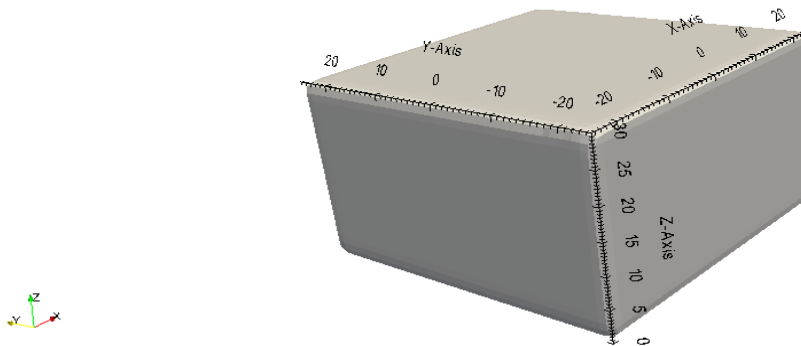


Figura 20: Estructura del patio

Para traspasar la estructura generada por el CAD Onshape® a OpenFOAM®, se exportó lo generado en formato STL. Este formato aproxima a las superficies de un modelo sólido a través de una combinación de triángulos. A mayor complejidad, mayor cantidad de triángulos son requeridos para una correcta aproximación. De esta forma, es posible reconstruir una geometría cualquiera y manejarla desde otro programa.

Como ya se explicó, el mesh sirve para resolver las ecuaciones de conservación de momento y masa en cada una de las celdas. A mayor cantidad de celdas, mayor precisión, pero también más tiempo de cálculo. Por esta razón, se debe elegir con cierto criterio a las zonas que tendrán mayores cantidades de celdas.

En la imagen que sigue se puede apreciar el Mesh realizado sobre el contorno de la superficie, como también una zona refinada en el centro.

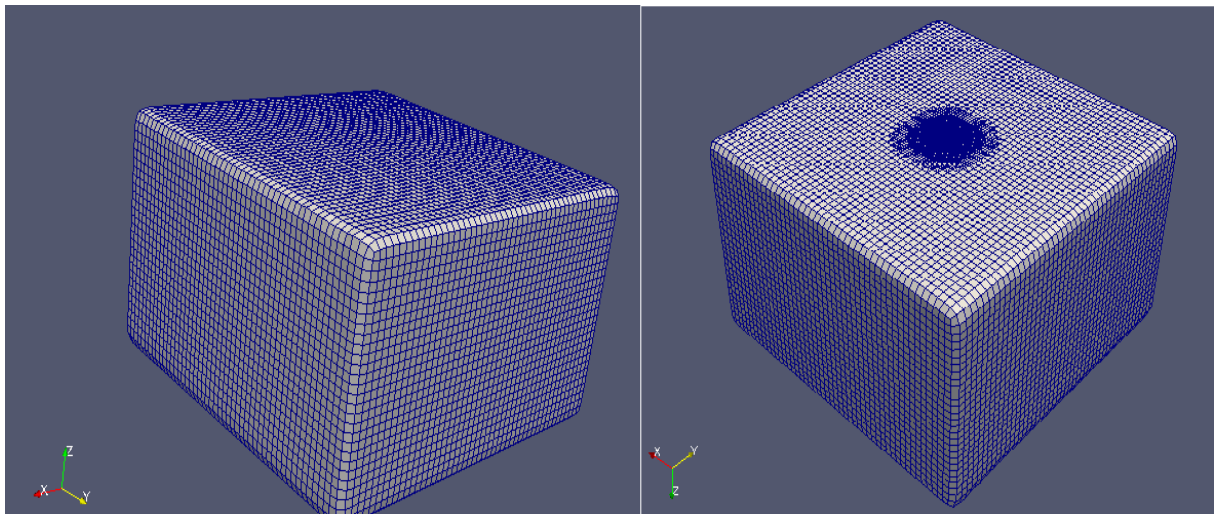


Figura 21: Malla de patio UADE

Como se puede observar en el segundo gráfico de la Figura 21, el dispositivo estará ubicado en el centro del patio. Consistente con lo que ya aclaramos anteriormente, en este proyecto el dispositivo será cilíndrico, razón por la que la sección transversal del mismo es circular.

Una vista isométrica en modo Wireframe (trata al objeto como si su superficie estuviera compuesta por cables, permitiendo vista al interior) permitirá apreciar con mayor detalle la geometría usada. Se puede observar que el dispositivo se encuentra a 4m sobre piso del patio, otorgándole una altura total de 10m.

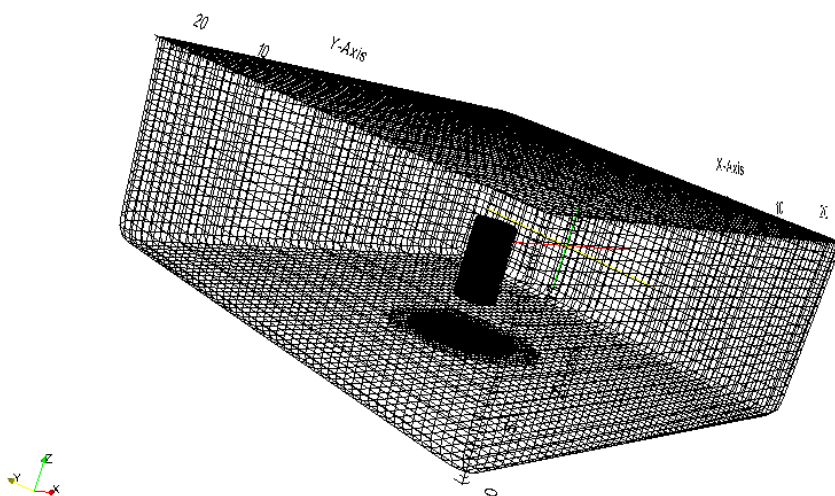


Figura 22: Vista del sistema en modo Wireframe

En la siguiente figura se podrá apreciar el refinamiento del mallado. Esto se debe a que, como se detalló anteriormente, existen zonas que son de mayor interés que otras, siendo la principal en este caso el centro del dispositivo. Le sigue en orden de importancia las zonas próximas al centro. El fin es poder resolver de manera más precisas a la ecuación de Navier-Stokes para lograr simular de manera más acorde a la realidad.

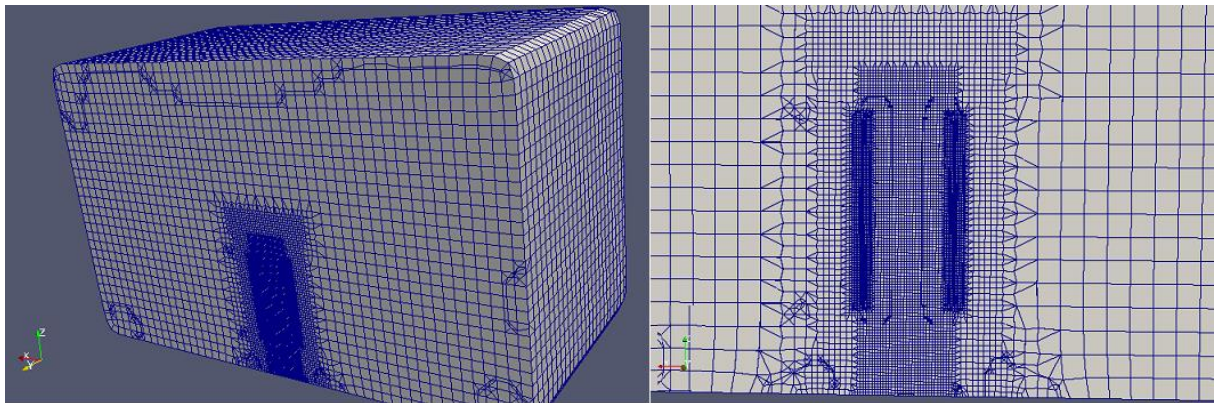


Figura 23: Refinamiento del mallado en zonas de interés.

Si bien el mallado anterior es sumamente preciso dada la cantidad de celdas con la que se lo analizó, provoca una simulación demasiado lenta para lograr ser analizada de manera eficiente. Para solucionar esto, se decidió aplicar una simplificación. Dado que el fin del sistema es refrigerar entornos cercanos a su instalación, es coherente asumir que no nos interesarán los valores en zonas alejadas al centro del patio (suponiendo que allí sea donde uno instale el dispositivo), o por decirlo de otra forma, no tendremos en cuenta lo sucedido en las “esquinas”. Dado esto, podemos reinterpretar al cubo como un cilindro, de diámetro igual al largo del patio. Aprovechando la simetría de revolución del sistema (considerando que tanto el dispositivo, como la parte que nos interesa del patio, son cilíndricas) podemos reducir un problema tridimensional, a un problema bidimensional rotativo. Esto se logró a través de una modificación axial usando cfMesh.

De esta forma se pudo reducir la dificultad en el dibujo esquemático, como también disminuir los tiempos de cálculos necesarios. Aplicando esto al mallado del sistema, obtenemos como resultado a la siguiente simplificación:

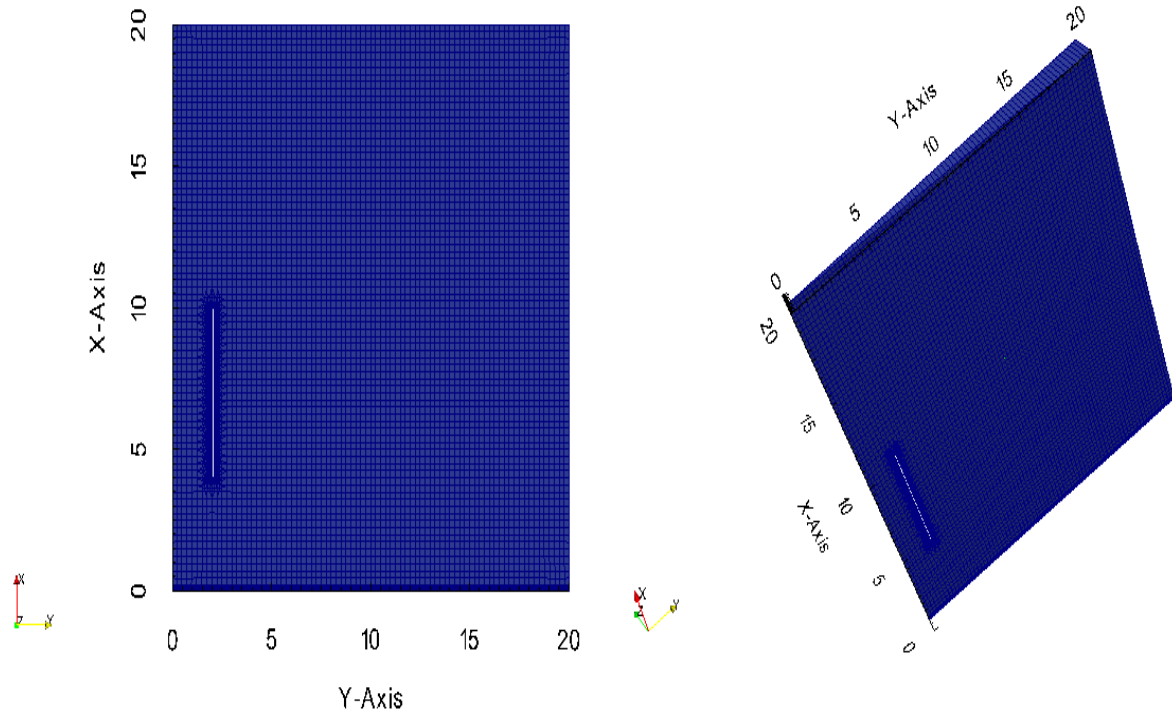


Figura 24: Mallado de estructura con simetría de revolución

Esta simplificación, si bien útil, nos modifica el sistema de referencia. Esto es porque el código empleado para convertir el sistema a uno bidimensional con simetría de revolución, toma como eje X al de rotación, con lo cual, el término gravitacional estará ubicado en el vector correspondiente a los valores en X.

Respecto al refinamiento en zonas próximas a las de recirculación, en el próximo gráfico se lo podrá apreciar. Al reducir una dimensión del problema, podemos concentrar mayor cantidad de celdas a lo largo del dispositivo para incrementar la precisión del resultado, ya que disponemos de más poder de cálculo. Cabe señalar que el vacío visible en la figura siguiente se debe a que el dispositivo es cilíndrico, y por lo tanto posee tanto un diámetro interno como un diámetro externo. Esta diferencia de diámetro, proyectado a lo largo de su eje axial es la que provoca esta ausencia de celdas.

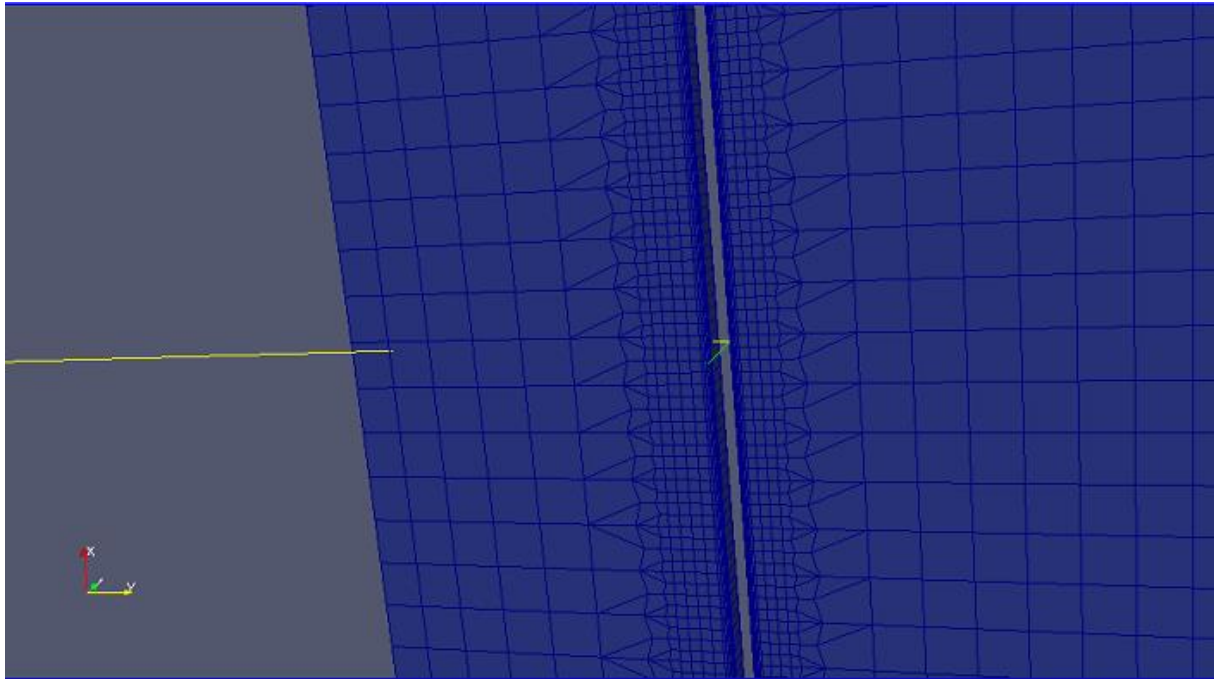


Figura 25: Refinamiento del Mesh en zonas cercanas al dispositivo

De esta manera concluimos con la generación del mallado del sistema. El paso siguiente será decidir el solver a usar para realizar la simulación, el cual cambiará las ecuaciones de transporte a resolver, y los algoritmos usados para resolverlas.

4.3.2 Solver

OpenFOAM® no tiene un solucionador genérico aplicable a todos los casos. En cambio, los usuarios deben elegir un solucionador específico para resolver una clase de problema. Los solver con la distribución OpenFOAM® se encuentran en el directorio \$FOAM_SOLVERS. Este directorio se subdivide en varios directorios por categoría de mecánica continua, por ejemplo, flujo incompresible, transferencia de calor, multifase, lagrangiano, combustión, etc. A cada solucionador se le da un nombre descriptivo. Para algunos, principalmente solucionadores incompresibles, refleja el algoritmo, por ejemplo, simpleFoam usando el algoritmo SIMPLE, pimpleFoam usando el algoritmo PIMPLE. Con más frecuencia, el nombre refleja los modelos físicos o el tipo de problema que está diseñado para resolver, por ejemplo, sonicFoam, cavitatingFoam, entre otros.

El solver que emplearemos para solucionar el problema es `buoyantBoussinesqPimpleFoam`, el cual es uno de los solucionadores disponibles para casos de transferencia de calor. Específicamente, se trata de un solver para flujos turbulentos boyantes de fluidos incompresibles.

Para entender con mayor detalle a este solucionador, se explicará el significado de su nombre, y luego las ecuaciones que lo gobiernan.

`Buoyant`, la primera parte del nombre, quiere decir empuje, lo cual, llevado a la transferencia de calor se refiere más en específico a la convección natural. Es decir, es un tipo de transporte del calor en donde el movimiento del fluido no es generado por ninguna fuerza externa (como ser una bomba, ventilador, etc.) sino que es impulsado por la diferencia de densidades en el fluido que se produce debido al gradiente de temperatura. En la convección natural, el fluido que rodea una fuente de calor recibe calor, se vuelve menos denso y se eleva. El fluido circundante y más frío se mueve para reemplazarlo. Este fluido más frío se calienta y el proceso continúa, formando una corriente de convección; este proceso transfiere la energía térmica desde la parte inferior de la celda de convección hasta la parte superior. La fuerza motriz de la convección natural es entonces el empuje, resultado de las diferencias en la densidad del fluido.

`Boussinesq`, la segunda parte del nombre, refiere a una aproximación usada en el campo de la convección natural. Ignora las diferencias de densidad, excepto cuando aparecen en términos multiplicados por g , la aceleración debida a la gravedad. La esencia de la aproximación de Boussinesq es que la diferencia de inercia es insignificante, pero la gravedad es lo suficientemente fuerte como para hacer que el peso específico sea apreciablemente diferente entre los dos fluidos. Las ondas de sonido son desestimadas cuando se usa la aproximación de Boussinesq ya que las ondas de sonido se mueven a través de variaciones de densidad.

El último término es `Pimple`, y es en mención al algoritmo PIMPLE, el cual es aplicado en casos de flujos transitorios para resolver la ecuación de Navier-Stokes (conservación del momento lineal). Es una combinación de los algoritmos PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) y SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), los cuales también son algoritmos usados para resolver la ecuación de Navier-Stokes. De manera resumida, el algoritmo SIMPLE se basa en lo siguiente:

1. Se obtiene una aproximación del campo de velocidad resolviendo la ecuación de momento. El término de gradiente de presión se calcula usando la distribución de presión de la iteración anterior o una conjetura inicial.
2. La ecuación de presión se formula y se resuelve para obtener la nueva distribución de presión.
3. Las velocidades se corrigen y se calcula un nuevo conjunto de flujos conservativos.

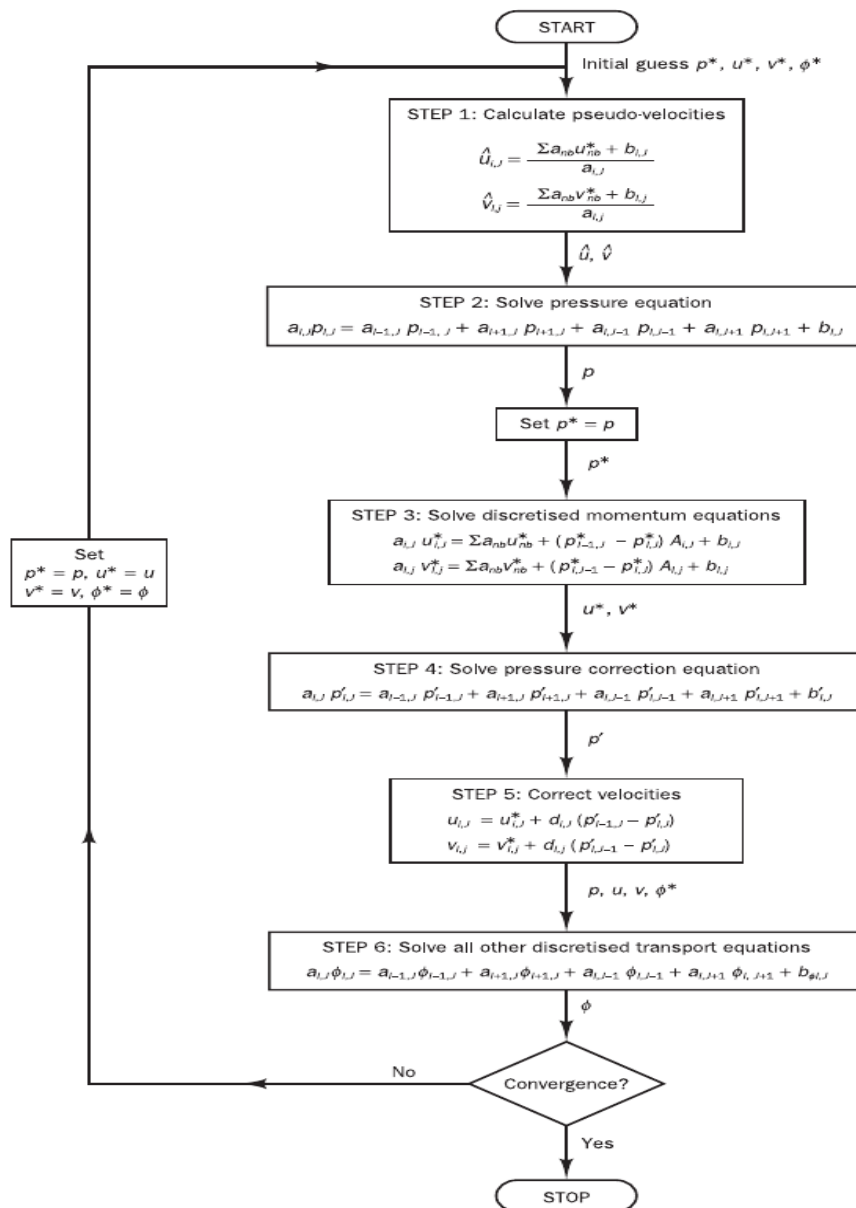


Figura 26: Algoritmo SIMPLER (Versteeg, 1995)

La figura 26 detalla el diagrama de flujo del algoritmo SIMPLER, el cual es una versión modificada del SIMPLE, siendo más rápido y más fácil de implementar:

En sí, el algoritmo PIMPLE se basa en el algoritmo SIMPLER, pero para casos de flujos transitorios, y posee un paso más de corrección. Respecto a las fórmulas que resuelve, se detallarán a continuación.

En presencia de un campo gravitacional, las ecuaciones de conservación de masa y momento son:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (55)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(u)) - \nabla \cdot \left(\frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot u) \right) \quad (56)$$

donde u es el campo de velocidad, p es el campo de presión, ρ es el campo de densidad y g es la aceleración gravitacional. La viscosidad efectiva μ_{eff} es la suma de la viscosidad molecular y turbulenta, y la tasa de tensor de deformación $D(u)$ se define como:

$$D(u) = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (57)$$

Si la densidad y la aceleración gravitacional son constantes, la fuerza gravitacional se puede expresar en términos de gradiente:

$$\rho g = \nabla(\rho g \cdot r) \quad (58)$$

donde r es el vector de posición, de modo que el gradiente de presión y la fuerza de gravedad se pueden agrupar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\nabla p - \rho g = \nabla(p - \rho g \cdot r) \quad (59)$$

Ahora consideraremos el caso donde la densidad no es constante. La aproximación de Boussinesq es válida cuando la variación de la densidad inducida por el cambio de temperatura es pequeña, entonces si la variación de la densidad no es sustancial, uno puede tratar a la densidad como constante en los términos convectivos e inestables, y tratarla como variable sólo en los términos gravitacionales.

En adelante, denotaremos la densidad ρ_0 como aquella a la temperatura de referencia T_0 . Si reemplazamos a ρ por ρ_0 en las ecuaciones (55) y (56), excepto en el término gravitacional, obtenemos:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (60)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 uu) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(u)) \quad (61)$$

Si dividimos a la ecuación (61) por ρ_0 a ambos lados, obtenemos:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p + \rho g) + \nabla \cdot (2\nu_{eff} D(u)) \quad (62)$$

Aquí, la densidad ρ en el término gravitacional se expresa mediante la función lineal de la temperatura T :

$$\rho \approx \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (63)$$

siendo β el coeficiente volumétrico de expansión térmica.

En términos de implementación, los términos de gradiente de presión y fuerza de gravedad se reorganizan de la siguiente forma:

$$-\nabla \left(\frac{p}{\rho_0} \right) + \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) g = -\nabla \left(\frac{p - \rho g \cdot r}{\rho_0} + \frac{\rho g \cdot r}{\rho_0} \right) + \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) g = -\nabla p_{rgh} - (g \cdot r) \nabla \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (64)$$

donde definimos a nueva variable $p_{rgh} = (p - \rho g \cdot r) / \rho_0$, con lo que finalmente podemos obtener:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\nabla p_{rgh} - (g \cdot r) \nabla \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \nabla \cdot (2\nu_{eff} D(u)) \quad (65)$$

Esta ecuación de momento es la que será resuelta mediante el algoritmo mencionado anteriormente.

4.3.3 Acople MATLAB® con OpenFOAM®

Si bien el solver mencionado anteriormente resuelva el modelado que se realizó, no incluye una forma fácil de incluir un sumidero de calor. Para esto, se recurrió a un archivo llamado fvOptions, el cual permite modificar el solver utilizado para contemplar situaciones adicionales (en nuestro caso, el sumidero). Al no haber manera sencilla de incorporar el sumidero térmico que se obtuvo en el modelado en dicho archivo, se recurrió a una discretización del sumidero. Esto consiste en calcular el sumidero promedio por cada metro de altura. Adicionalmente, el archivo mencionado obliga a que el sumidero sea independiente del fluido en el que encuentra el líquido, por lo que se lo debe dividir por la densidad del fluido, como también por su calor específico. El resultado es una tasa de cambio de temperatura.

El siguiente gráfico muestra la convergencia final de este valor, comparado con el sumidero. La única diferencia será la magnitud, ya que está dividido por una constante.

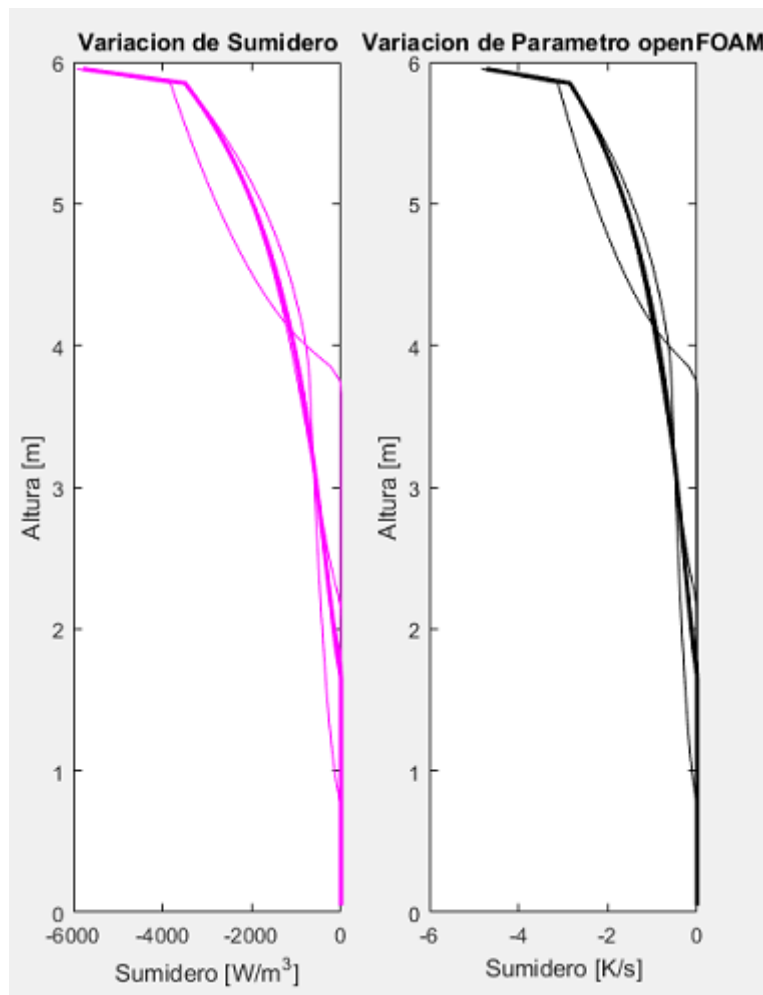


Figura 27: Sumidero y Parámetro OpenFOAM luego de 15 iteraciones

Para sacar el promedio por metro o división, simplemente se descompuso el vector en varios vectores de menor longitud, tal que cada vector guarde la información por metro de avance. En nuestro caso entonces, los vectores son 6, correspondiendo uno por cada metro de altura. Paso seguido, se realizó el promedio de cada vector, obteniendo así 6 escalares, los cuales fueron almacenados en otro vector de 6 elementos, en donde el primer valor correspondía al promedio del primer metro, el segundo valor al promedio del segundo metro, y así. A la par, se generaron 6 superficies mediante la carpeta topoSetDict, las cuales serán aquellas pertenecientes a cada una de las 6 metros o divisiones.

En resumen, se extrajo el promedio del sumidero de calor por cada metro de avance. Cada uno de los valores promedios fueron asignados a una determinada superficie, las cuales cuando se combinan, coinciden con el cilindro que consideramos ser el dispositivo. En otras palabras, el dispositivo fue reemplazado por un sumidero de calor, discretizado en metros (6 en total), en donde cada división posee un valor determinado resultado de promediar el sumidero obtenido en el modelado metro a metro.

4.3.4 Parámetros Termodinámicos y Condiciones de Borde

Los valores de sumidero térmico empleados son los siguientes:

- 0 [K/s] de 0m a 1m;
- -0,017 [K/s] de 1m a 2m;
- -0,286 [K/s] de 2m a 3m;
- -0,635 [K/s] de 3m a 4m;
- -1,196 [K/s] de 4m a 5m;
- -2,457 [K/s] de 5m a 6m;

Esto se puede visualizar en el archivo fvOptions dentro de la carpeta System.

Se eligió como temperatura ambiente inicial a 303 K, lo cual es aproximadamente 30°C.

Tanto el piso (eje $X=0$) como los laterales de la superficie poseen una temperatura fija de 303 K, distribuido uniformemente. El techo se trata como una toma de entrada y salida con gradiente nulo, con valor inicial de 303 K. Las velocidades en todo el recinto se tomaron como nulas en todas las direcciones, indicando que no había viento previo al accionamiento del dispositivo.

4.3.5 Resultados de la Simulación

Las dos variables que analizaremos es la temperatura, y la velocidad. Esta última contemplaremos tanto su componente axial, como también la longitudinal. Esto es porque el

fin del dispositivo, aparte de disminuir la temperatura, es generar una corriente de recirculación de aire para lograr simular una brisa.

4.3.5.1 Resultados de Temperatura

Se muestra a continuación el campo de temperaturas para distintos tiempos.

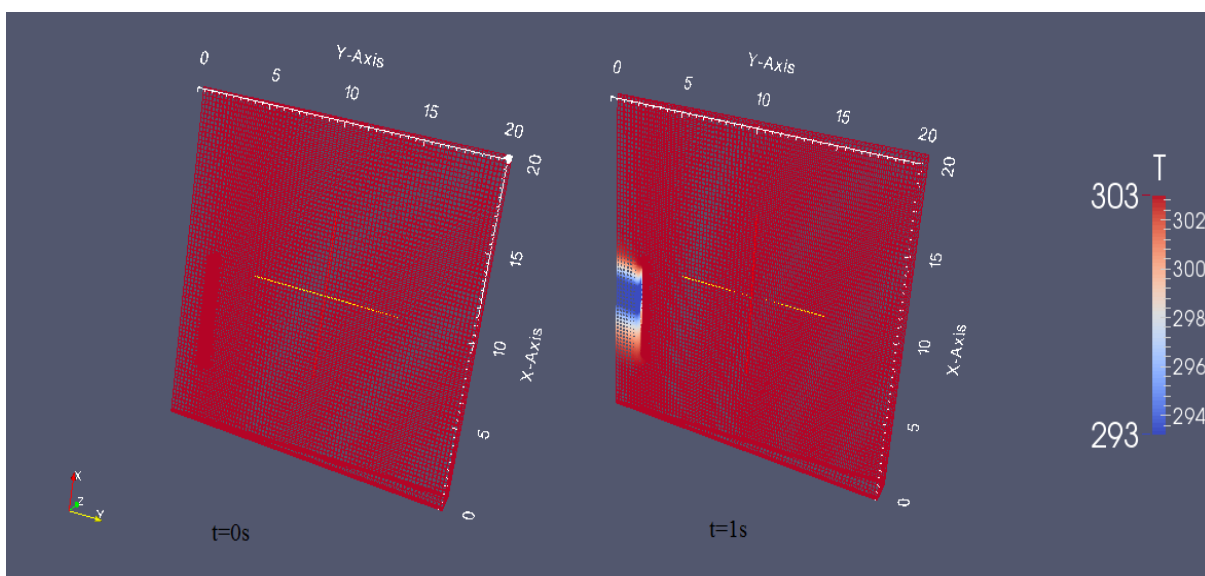


Figura 29: Campo de Temperaturas para $t=0s$ y $t=1s$ respectivamente

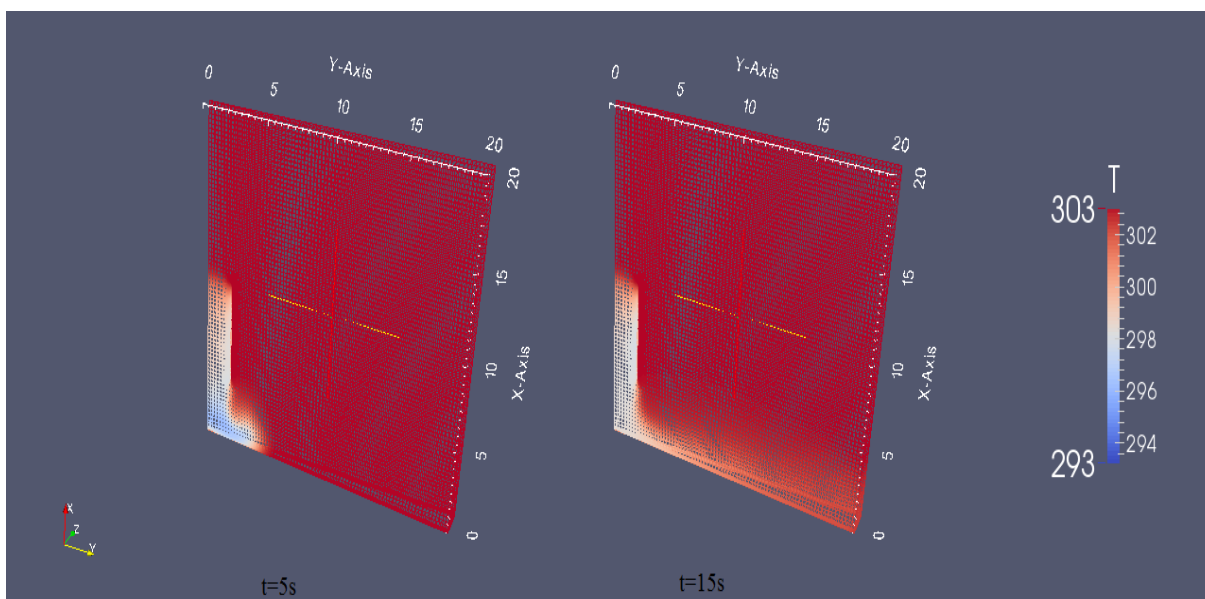


Figura 28: Campo de Temperaturas para $t=5s$ y $t=15s$ respectivamente

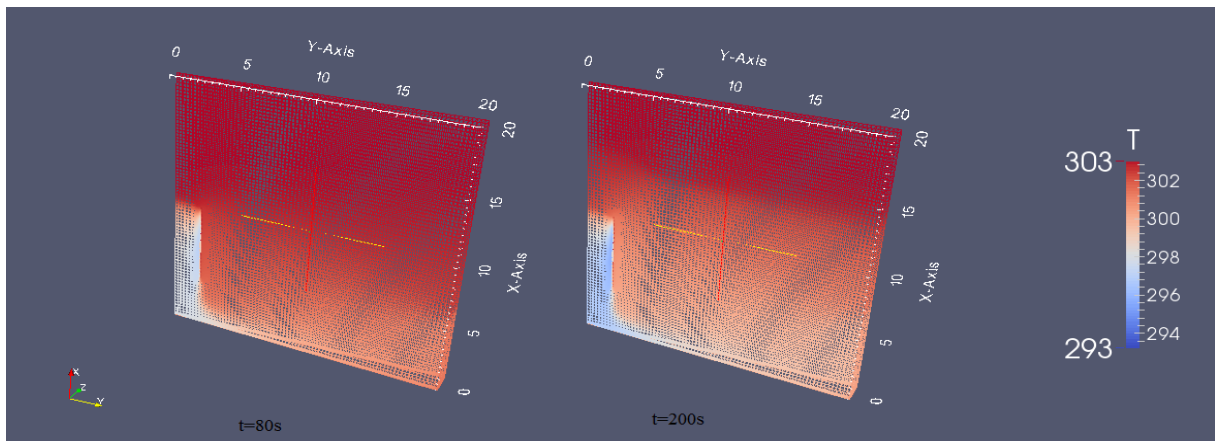


Figura 31: Campo de Temperaturas para $t=80s$ y $t=200s$ respectivamente

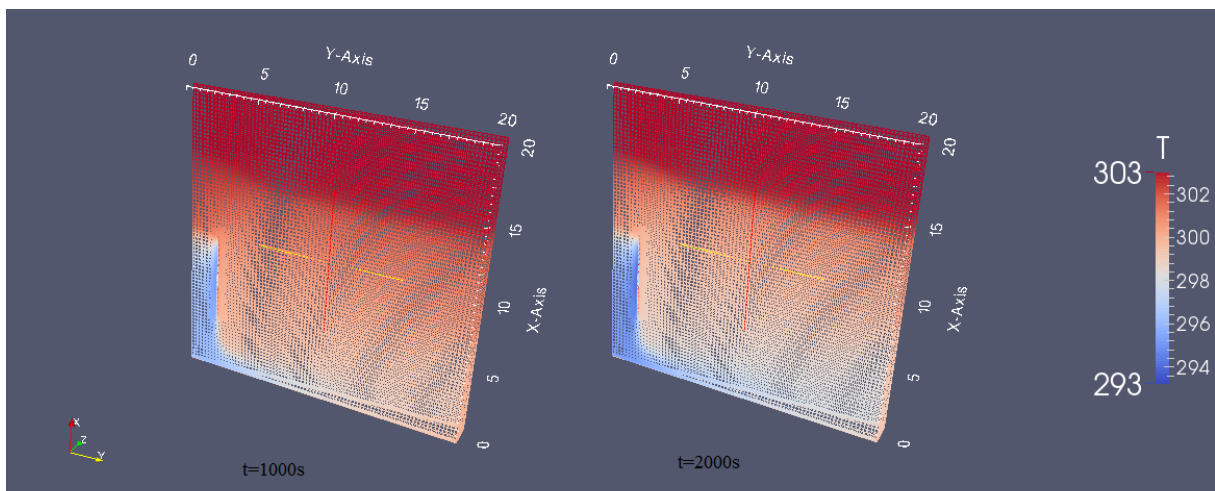


Figura 30: Campo de Temperaturas para $t=1000s$ y $t=2000s$ respectivamente

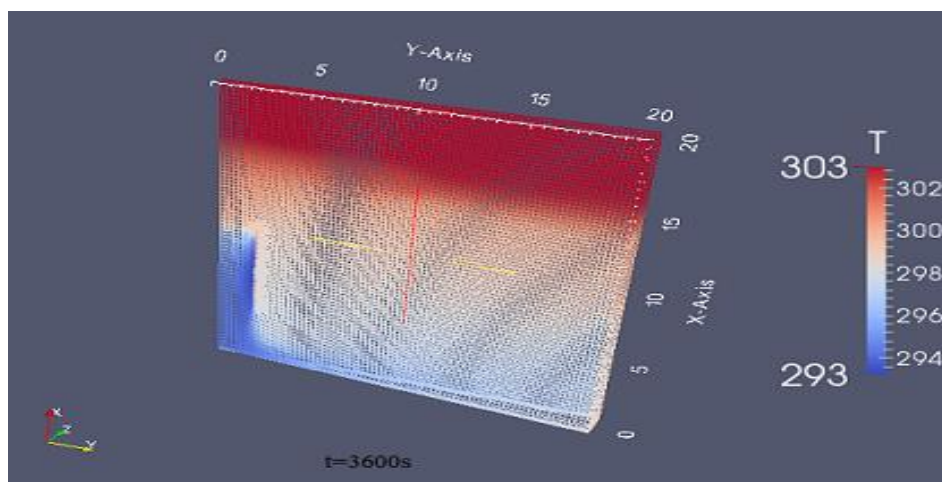


Figura 32: Campo de Temperaturas para $t=3600s=1$ hora

Como se logra apreciar en las distintas imágenes, la convección natural provoca que el aire enfriado descienda. Esto sucede porque el aire húmedo es más denso que el aire seco superior. Esto concuerda con el concepto de estratificación, el cual nos dice simplemente que el aire forma una serie de capas de temperatura una encima de otra hasta llegar al techo, donde se concentra el aire más caliente.

Para visualizar el cambio en forma gráfica, a continuación, se mostrará el estado de temperatura final (es decir, transcurrido 1 hora). El eje de abscisas corresponde a la altura (recordar que cambiar la estructura a una con simetría de revolución provocó que el eje X se tome como el eje de rotación) mientras que el eje de indica la temperatura. Para este análisis se eligió como eje de estudio a aquel ubicado a 1m del origen, es decir, dentro de la torre de enfriamiento, o $X=1m$.

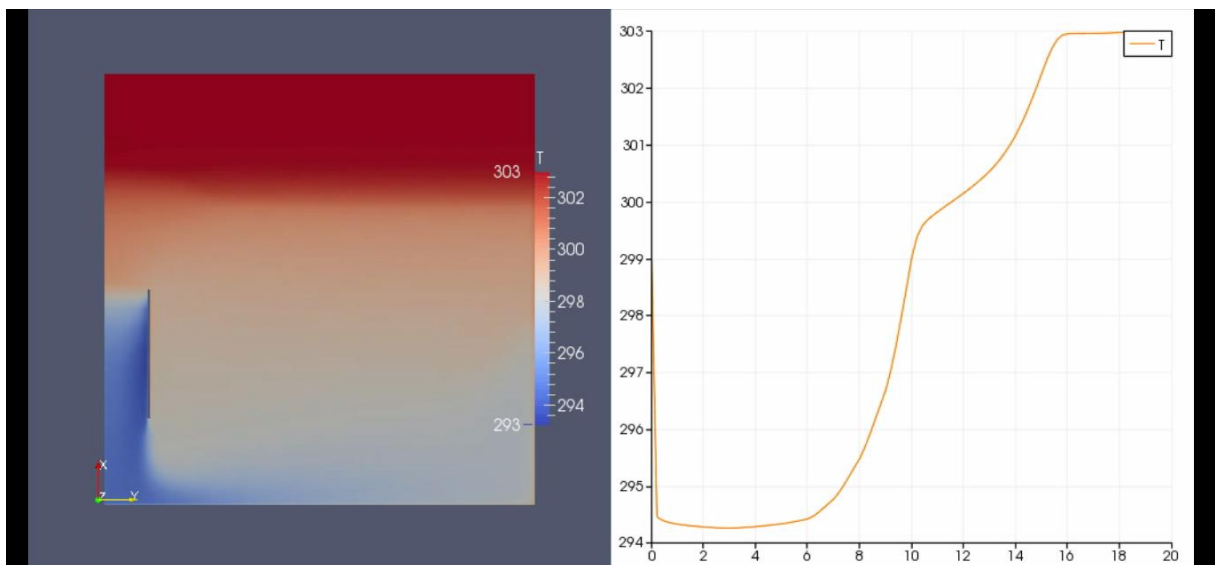


Figura 33: Variación de Temperatura con la Altura transcurrido 1 hora

Esto nos reafirma el concepto mencionado previamente de estratificación, en donde el aire más caliente se concentra en la zona más alta.

Para percibir como cambia la temperatura a medida que nos alejamos de la torre de enfriamiento, se mostrará seguidamente la variación de la temperatura a lo ancho del sistema, es decir, paralelo al piso. Se optó como altura para realizar este análisis a 1,5m ya que, a esa altura, la persona promedio es impactada directamente por el viento y su temperatura, ya sea al caminar, sentado, etc. Es decir, el eje sobre el cual se hará el análisis es $Y=1,5$.

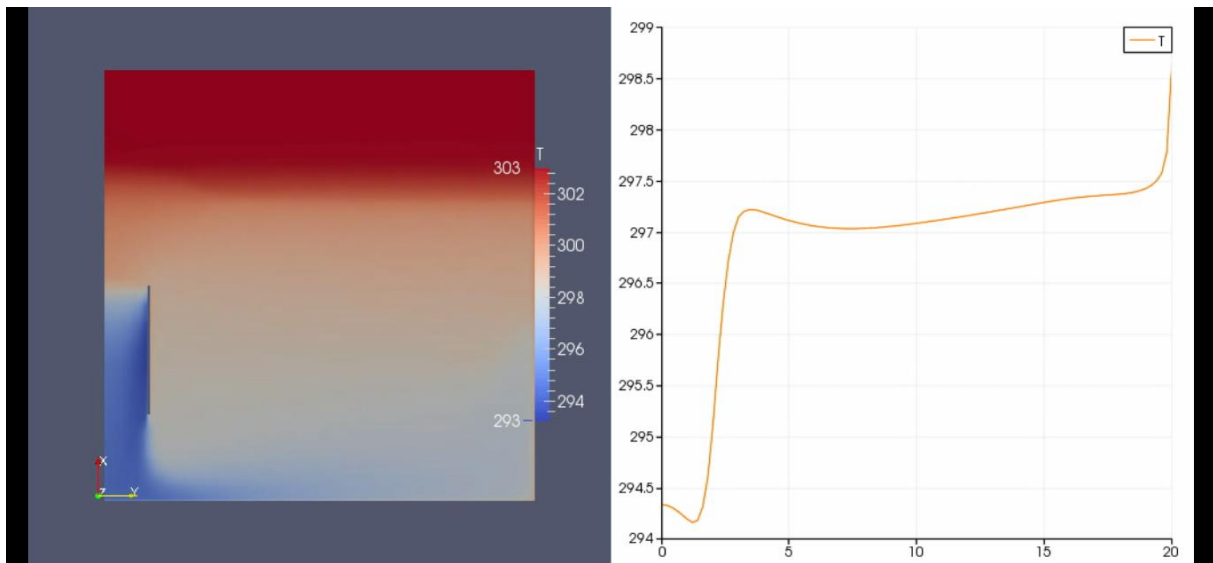


Figura 34: Variación de la Temperatura a lo ancho del patio, transcurrido 1 hora.

El gráfico muestra que aquel que se encuentra lo más lejos de la torre (distancia que se aproximó a 20m), percibirá una reducción de la temperatura de 4°C. Aquellos entre 3 a 15 m del centro del dispositivo sentirán una disminución de 6°C. Aquellos más cercanos experimentarán una caída térmica mucho mayor, llegando a ser hasta del orden de los 8°C.

4.3.5.2 Resultados de la Velocidad

Se muestra a continuación el campo de velocidades para distintos tiempos.

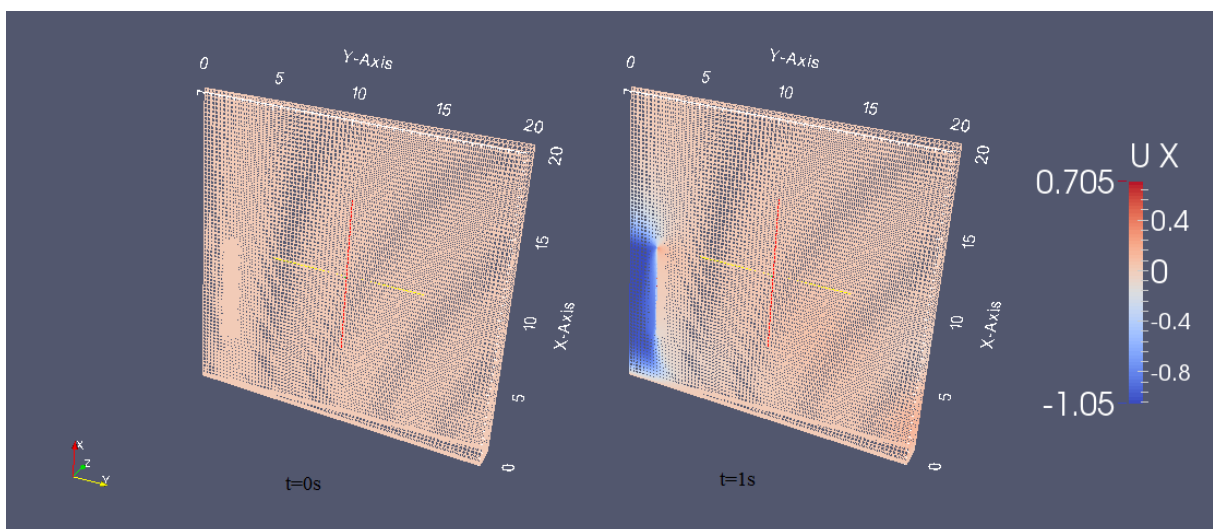


Figura 35: Campo de Velocidades para t=0s y t=1s, respectivamente

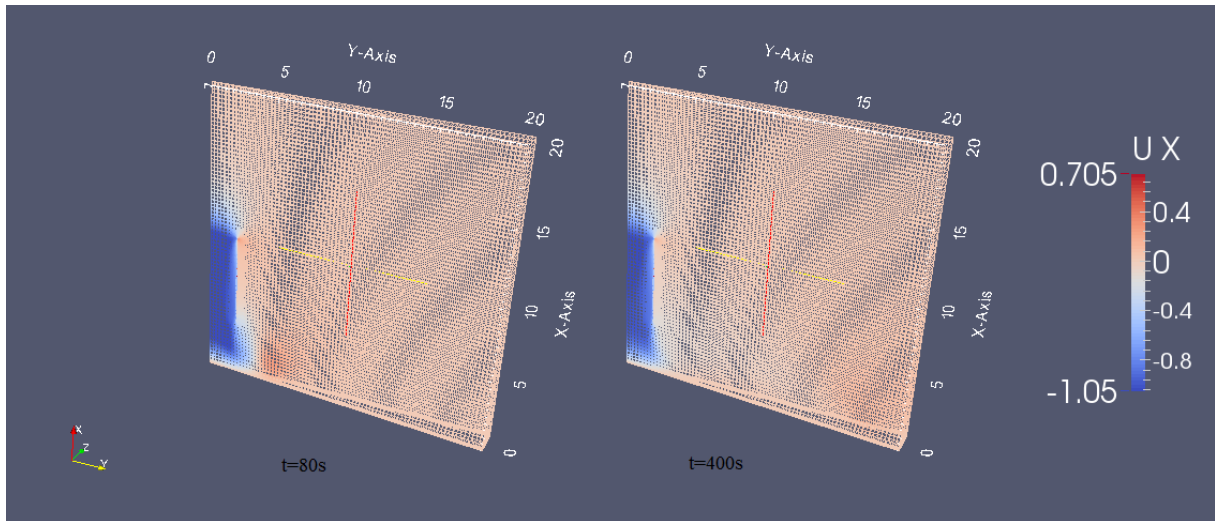


Figura 36: Campo de Velocidades para $t=80s$ y $t=400s$, respectivamente

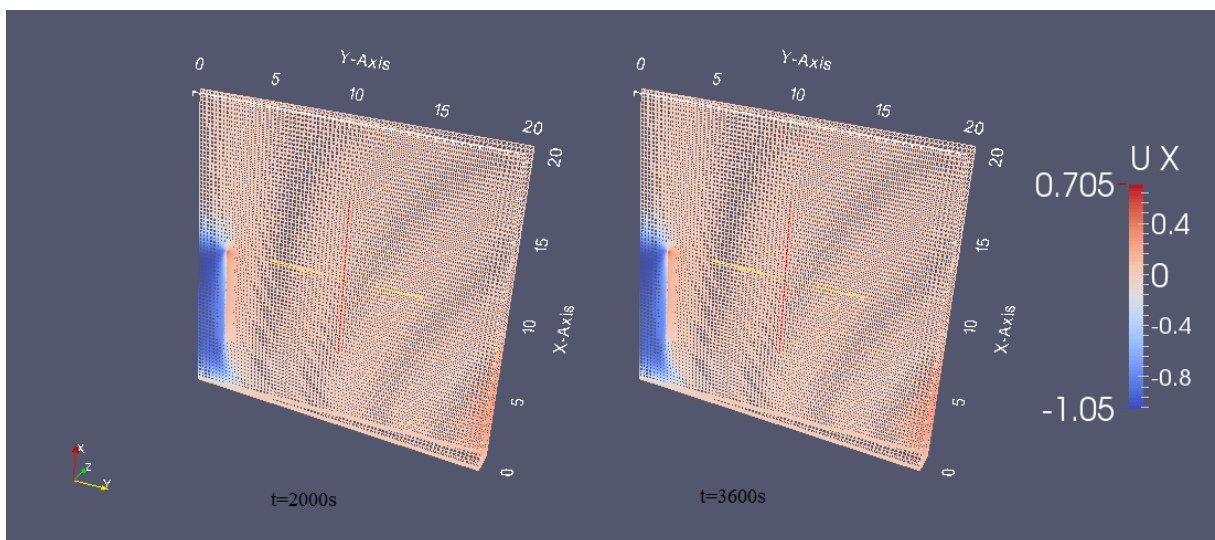


Figura 37: Campo de Velocidades para $t=2000s$ y $t=3600s$, respectivamente

Se puede observar que el cambio en la velocidad en el eje X está concentrado en la zona más próxima a la torre de enfriamiento. El signo de la velocidad es debido a que el aire desciende, por lo que se lo entiende como de signo negativo. Alejándonos del centro de la torre, notamos un incremento en la velocidad hasta llegar a ser del orden de 0,4 m/s.

Para poder analizar el movimiento de las partículas de aire con más detalle, se procederá a asignar un vector a las partículas (obviamente no a todas, sino el número necesario para lograr percibir el movimiento convectivo). El resultado es el siguiente:

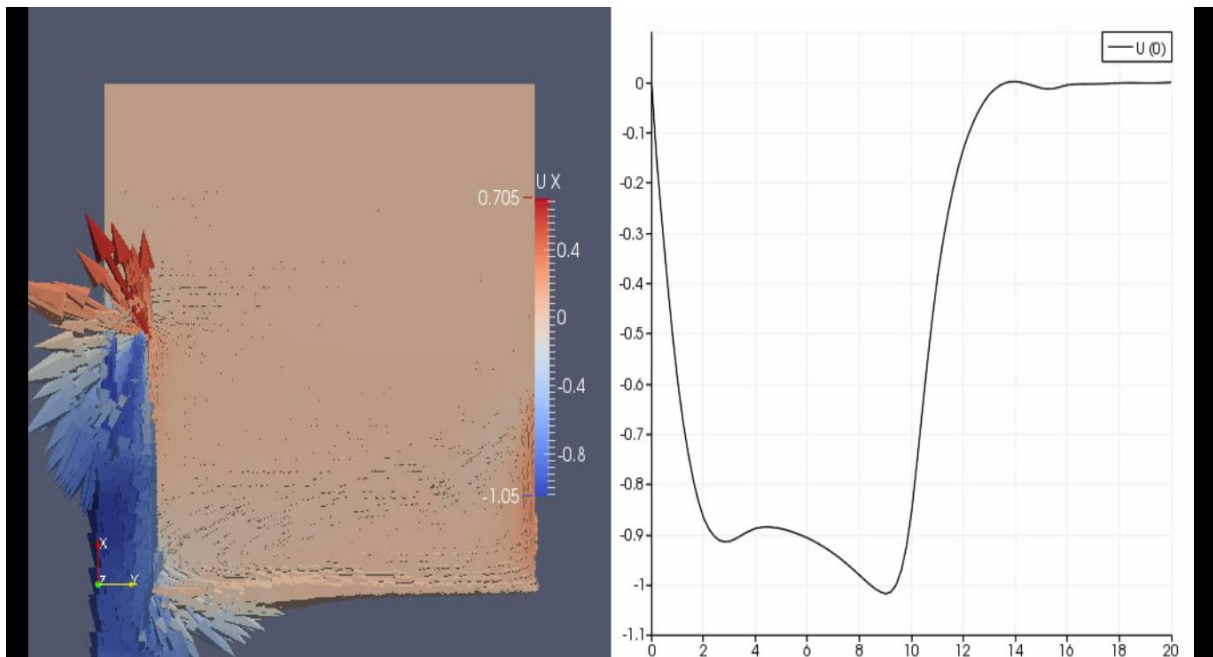


Figura 38: Variación de la Velocidad con la altura, transcurrido 1 hora

El eje de abscisas denota la altura mientras que el de ordenadas mide el valor de la velocidad. Se tomó como eje de estudio a $X=1\text{m}$, es decir, situado sobre el eje de la torre. Se logra apreciar que existe dos flujos de recirculación, tanto en la zona inferior como en la zona superior. El gráfico nos muestra que la torre genera una corriente de aire muy pronunciada, llegando a ser del orden de 1 m/s , lo cual es consistente con el valor inicial de aire utilizado en el modelado (ver Apéndice A). Justo en la zona superior de entrada al dispositivo convergen las velocidades producto de la recirculación y la propia del aire enfriado, de colores rojizos y azulados, respectivamente. Cualquier persona situada exactamente debajo de la torre experimentará un aire de 1m/s . En la escala Beaufort, escala empírica que relaciona velocidades del viento con turbulencias en el mar, $3,6\text{ km/h}$ de velocidad es considerado una brisa leve.

Análogamente podemos generar un gráfico de la velocidad en sentido paralelo al piso (eje Y) y su variación a medida que uno se aleja de la torre. Igual al caso anterior, se asignará un vector a un número aleatorio (pero dentro de un rango predeterminado) de partículas de aire para poder visualizar su movimiento con mayor detalle en lugar de una nube. Será importante notar las corrientes de recirculación que genera la torre dado que la componente horizontal de la velocidad es, por definición, el viento.

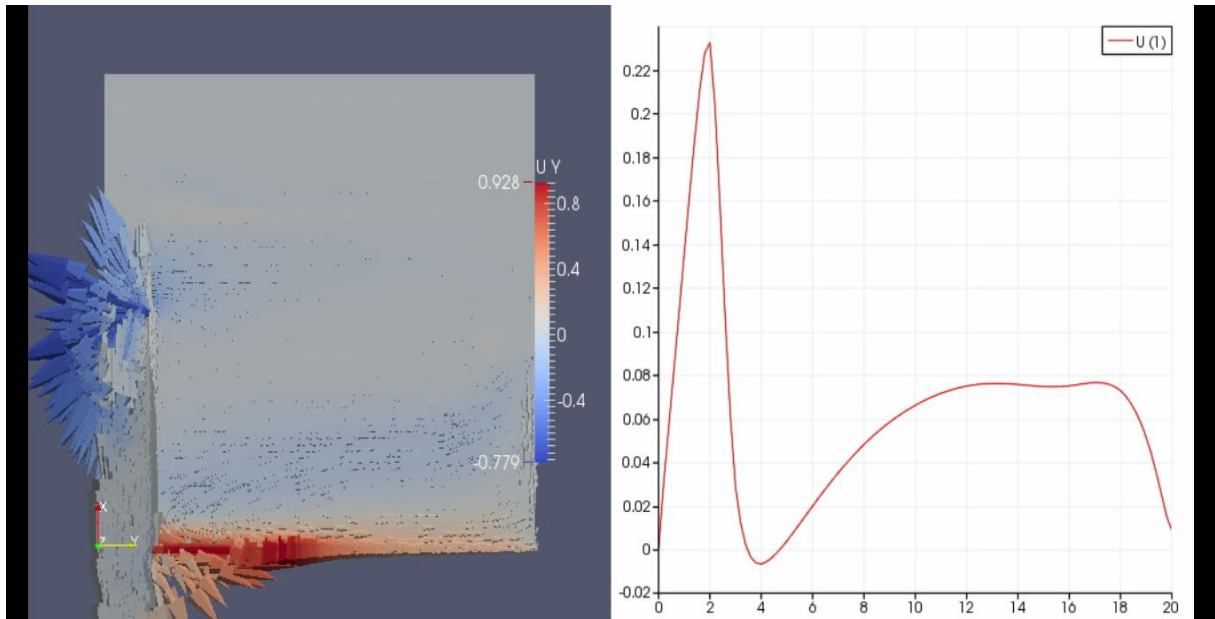


Figura 39: Variación de la Velocidad con la componente longitudinal, transcurrido 1 hora

El signo de la velocidad es debido a que, en nuestro sistema de referencia, se toma como incremento en eje Y al sentido derecho. Aquí se diferencian de manera clara dos corrientes de recirculación, una próxima al piso, y otra entre el límite inferior de la torre (situado a 4m sobre el suelo) y el límite superior (10m).

Personas situadas entre 0 a 4m de la torre experimentarán un aumento de la componente horizontal de la velocidad, con un máximo de hasta 0,25 m/s. En 4m se obtuvo una raíz, debida en gran parte a que es el punto de convergencia de las corrientes de recirculación en sentidos contrarios. Personas más alejadas que 4 metros no sentirán un viento apreciable (pero si sentirán aquel que es resultado de la componente vertical, ya que la velocidad es un vector y no un escalar).

5 Discusión

La ecuación general (Ec. (11)) podría simplificarse considerablemente, siempre que se pudieran desprestigiar los procesos transitorios. Se demostró que los procesos transitorios (adaptación de velocidad y temperatura) ocurren en una escala de tiempo mucho más corta que la vida útil total de una gota de agua. Por lo tanto, la evaporación de una gota se puede aproximar cercanamente mediante la evaporación constante. La tasa de evaporación K se aproxima acertadamente mediante una función lineal del diámetro de la gota y la diferencia entre la temperatura del bulbo seco y la temperatura del bulbo húmedo.

En varios casos, sin embargo, no se pueden desestimar los procesos transitorios. Estos incluyen simulación de gotas relativamente grandes en estudios de difusión. En estos casos, el tiempo de vuelo de las gotas es mucho más corto que el de su vida, ya que las gotas afectarán rápidamente al suelo. El tiempo de vuelo para esas gotas liberadas a alta velocidad puede ser del mismo orden de magnitud que la escala de tiempo de los procesos transitorios. Aunque la tasa de evaporación para grandes gotas es mayor que para pequeñas gotas (ver la ecuación (18)), el tiempo de vuelo es tan corto que no se producirá una evaporación significativa. Esto significa que, tanto si los procesos transitorios se calculan con precisión, como si solo se usa el modelo de evaporación constante, en ambos casos el volumen de líquido evaporado para gotas grandes es insignificante con respecto a la evaporación de gotas relativamente pequeñas.

Intuitivamente, las gotas pequeñas se evaporan más rápidamente que las gotas grandes. Esto es compatible con el aumento del tiempo de vida de forma progresiva con el aumento del tamaño de gota. Esto parece contrastar con la ecuación (18), que muestra que la tasa de evaporación aumenta al aumentar el diámetro. La velocidad de evaporación, sin embargo, se basa en el cambio de diámetro al cuadrado (es decir, el cambio en la superficie evaporativa), mientras que la evaporación 'visual' está relacionada con el cambio en el diámetro mismo. Por ejemplo, reducir a la mitad el diámetro de la gota por evaporación requiere mucha más energía y, en consecuencia, mucho más tiempo para una gran gota que para una pequeña gota, lo que ayuda a la evaporación intuitiva y rápida de pequeñas gotas. Sin embargo, el volumen del líquido cambiado en vapor es mucho mayor para la gran gota que para la pequeña. Por lo tanto, una gran gota de evaporación produce vapor más rápidamente que una pequeña gota, pero el cambio de diámetro correspondiente es menos pronunciado para la gota más grande.

El modelo presentado también puede usarse para otros disolventes, siempre que se conozcan parámetros como el peso molecular, el coeficiente de difusión y la presión de vapor saturada. Obviamente, en tales casos, la presión de vapor en el aire ambiente a menudo es cero. Además, cantidades como la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo no tienen significado para los solventes que no sean agua, y la diferencia de presión no se puede convertir en una diferencia de temperatura. Esto, sin embargo, no es una limitación para usar el modelo en una forma ligeramente adaptada.

La simulación computacional del proceso de evaporación de una gota líquida en un medio gaseoso es un estudio relativamente nuevo. No existe bibliografía en donde se haya logrado dicha simulación para el caso del agua en aire (sí para procesos de combustión con combustibles líquidos), o por lo menos no está disponible para la audiencia general.

No tener una base de referencia para comparar los resultados obtenidos tanto en el modelado como en la simulación con un resultado experimental complicó el análisis, ya que no hizo posible determinar con precisión cuán alejado de la realidad está la simulación realizada.

Lograr acoplar los resultados de dos softwares distintos (MATLAB® y OpenFOAM®) presentó cierta dificultad ya que no se puede hacer de manera directa, sino utilizando algún criterio simplificador. Al trabajar con vectores en el modelado, se deben promediar ciertos aspectos para poder utilizarlos en el simulador, lo cual utiliza parámetros escalares en su mayoría.

La forma más creativa y precisa de lograr asimilar una torre de enfriamiento a un parámetro resoluble por OpenFOAM® fue mediante la traducción de la torre a un sumidero térmico.

6 Conclusión

Los resultados obtenidos en la simulación son cualitativamente correctos. Responden al fenómeno de estratificación, en donde el aire más caliente se ubica en las zonas más altas. El salto de temperatura logrado en la simulación se asemeja al del modelado, promediando en un descenso de 5°C en zonas cercanas a la torre de enfriamiento.

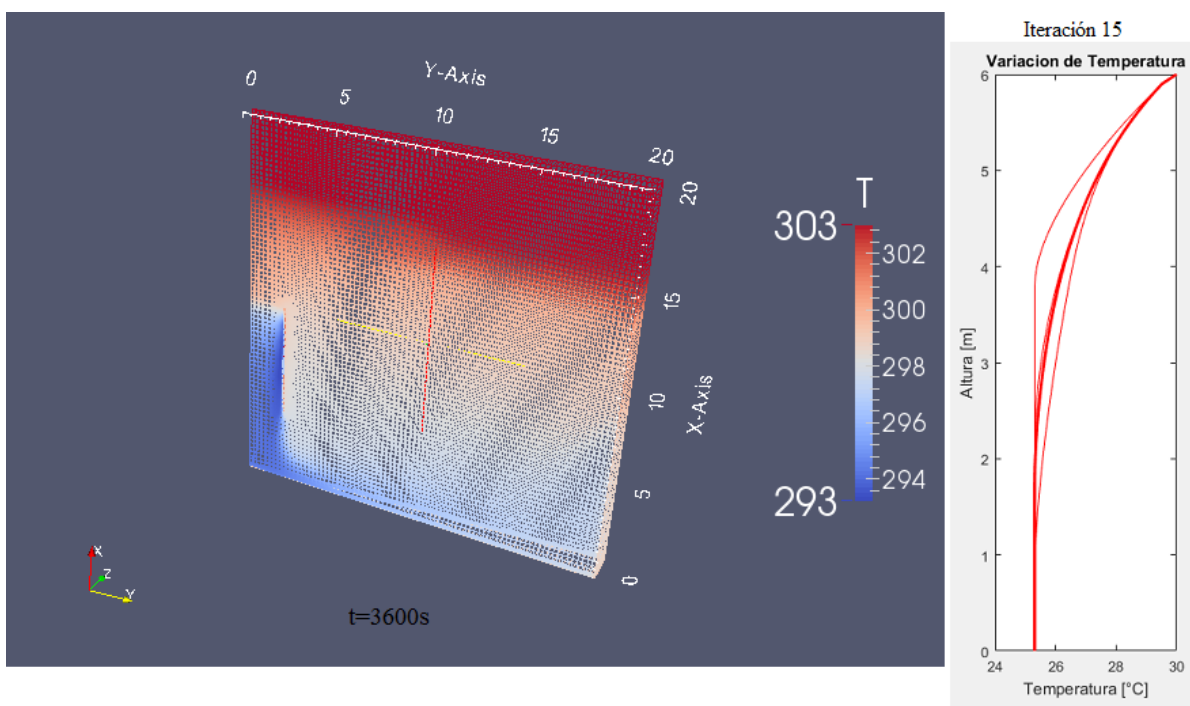


Figura 40: Variación de la Temperatura en la simulación y en el modelado, respectivamente

La velocidad del aire en dirección perpendicular al piso obtenida en la simulación coincide con la utilizada como parámetro de entrada en el modelado, con una diferencia del 4,8%, es decir, 5 cm/s.

Un objetivo importante fue lograr crear una corriente de recirculación de aire, de tal forma que no sólo se experimente una disminución de la temperatura, sino también una brisa leve. La simulación arrojó tales resultados.

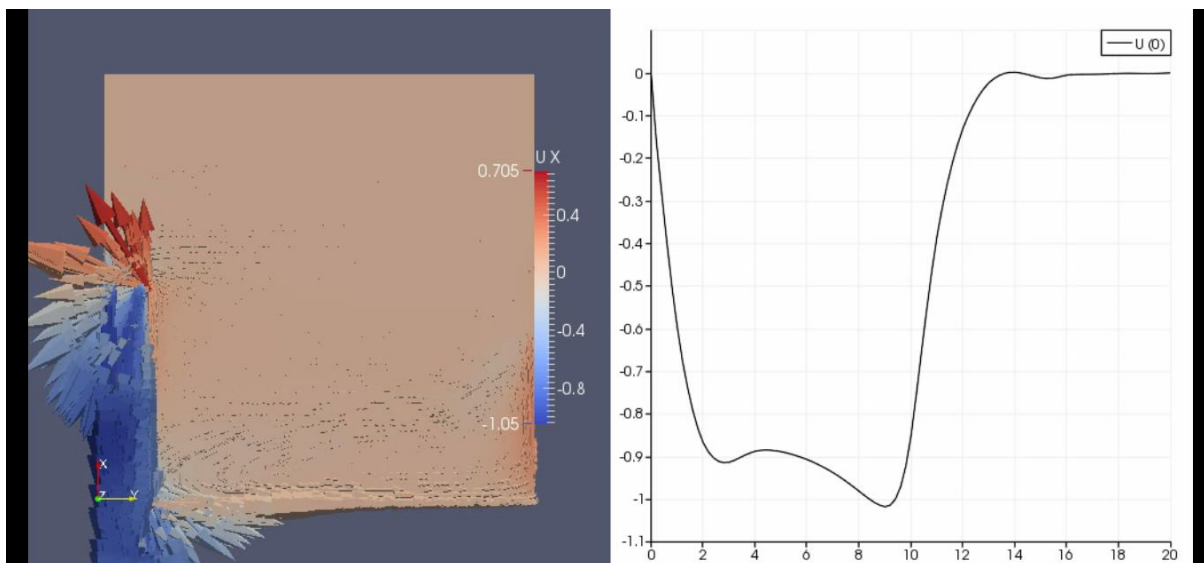


Figura 41: Variación de la Velocidad en eje X con la altura, transcurrido 1 hora

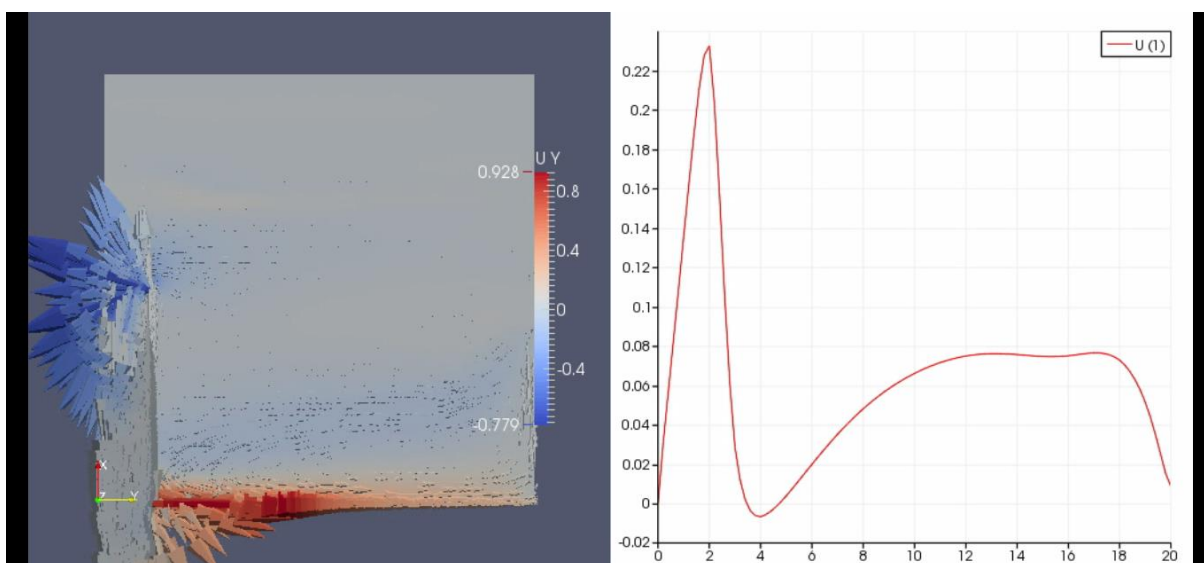


Figura 42: Variación de la Velocidad en eje Y con el ancho, transcurrido 1 hora

Tanto la componente vertical como la componente horizontal de la velocidad generan recirculación de aire, provocando una corriente de viento, cuya magnitud será la suma vectorial de dichas componentes.

Traduciendo los resultados obtenidos a números concretos, con una torre de enfriamiento de 6 m de largo, ubicada 4 m sobre el suelo, se logró un descenso de aproximadamente 5°C luego de 1 hora de funcionamiento para sectores ubicados a 20 m de la

instalación. Para lograr esto, se precisa de un caudal de agua de aproximadamente 8,5 litros/hora.

El modelado demostró que una gota de diámetro inicial de $60 \cdot 10^{-6}$ m se evaporará luego de 4,5 m de avance, en promedio. En una hora, esto provocaría un aumento de la humedad relativa de alrededor de 30%. Cabe destacar que para lograr esto, se necesitaría un atomizador capaz de generar gotas de dicho diámetro inicial.

Si bien el diseño preciso del dispositivo escapa el alcance de la presente tesis, se aclaró un posible diseño esquemático respecto a las dimensiones de la estructura que sería la torre de enfriamiento.

El presente trabajo se puede considerar como base para futuras simulaciones respecto a la refrigeración evaporativa en zonas semiabiertas. Extendiéndolo aún más, se podría simular procesos similares a pesar de utilizar otros líquidos y un medio gaseoso distinto, pero para esto se deberían ajustar los parámetros utilizados en el modelado.

Apéndice A: Valores empleados en el Modelado

En el presente apéndice se detallarán los valores de las variables utilizadas en el modelado.

Variables Químicas y ambientales

- Temperatura Ambiente Inicial: 30°C;
- Presión Ambiental Inicial: 1013 HPa;
- Humedad Relativa Inicial: 50%;
- Densidad del Aire: 1,225 Kg/m³;
- Densidad del Agua: 1000 Kg/m³;
- Calor Específico del Agua: 4180 J/(KgK);
- Calor Específico del Aire: 1,2 J/(KgK);
- Calor Latente de Evaporación del Agua: 22,6*10⁵ J/Kg;
- Constante Universal de los Gases: 8,3144 (m³Pa)/(MolK);
- Masa Molar del agua: 18,02 g/mol.
- Viscosidad Dinámica del aire: 1,8015*10⁻⁵ Kg/(ms).
- Gravedad: 9,81 m/s²

Variables Físicas

- Diámetro Inicial de gota de agua: 60*10⁻⁶ m;
- Velocidad de Corriente de Aire en sentido vertical descendente: 1 m/s;
- Cantidad de Gotas Líquidas por Metro Cúbico: 20*10⁶ 1/m³;
- Área del dispositivo (torre) considerado Cilíndrico: 1 m²;
- Largo del dispositivo (torre): 6 m;
- Números de discretizaciones del largo: 60.

Apéndice B: Métodos Numéricos Empleados a la Evaporación

El presente apéndice explicará el razonamiento para calcular las incógnitas de nuestro problema, conjuntamente con la visualización del código empleado en MATLAB®.

Será importante también notar los distintos criterios que utilizaremos para culminar con una iteración. Para estos criterios se puede usar el error relativo, el error absoluto, se puede definir un número máximo de iteraciones a realizar o también se puede utilizar un criterio “lógico”, el cual usaremos para calcular los distintos diámetros a lo largo de su trayectoria debido a la evaporación.

Velocidad de Sedimentación

Como lo indicamos en secciones anteriores, la velocidad de sedimentación se calcula a partir de la ecuación (9). Por lo tanto, la velocidad de sedimentación depende de $C_{d,s}$ el cual es el coeficiente de arrastre en la sedimentación; el cual depende de Re (ecuación (8)) y por lo tanto de la velocidad de sedimentación misma (usando la ecuación (1)). Esto implica que la velocidad de sedimentación sólo puede calcularse iterativamente, utilizando las expresiones anteriores.

Nuestras ecuaciones son entonces:

- $Re = \frac{\rho_a D v}{\eta_a}$
- $C_d = \left(\left(\frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c}$
- $v_s = \sqrt{\frac{4\rho_l g D}{3\rho_a C_{d,s}}}$

Para tal situación, emplearemos un lazo FOR, el cual irá recorriendo el sistema de ecuaciones mediante un contador, hasta un valor predeterminado, finalizando el lazo una vez se cumple cierta condición.

Considerando que todos los datos son constantes, salvo la velocidad (en este caso, la velocidad de sedimentación), debemos partir con un valor semilla de velocidad. Este valor semilla no es necesario que sea extremadamente exacto, sólo que esté en la vecindad lógica del resultado deseado. Se eligió a $15 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ como valor semilla.

Partiendo de este valor semilla, se calculará R_e , con este valor de R_e , se calculará C_d , y con C_d , calcularemos v_s . Una vez aquí, debemos preguntarnos si este último valor v_s difiere en gran cantidad al primer valor semilla. Si llegase a diferir por un gran margen, este último valor v_s que calculamos, será nuestra nueva semilla. Si la diferencia no es considerable, significa que la iteración convergió a un valor en particular, y esa será nuestra velocidad de sedimentación final. Esta pregunta la haremos exigiendo que el valor absoluto de la diferencia sea menor a 0.005, es decir, que las velocidades no difieran en más 5 milímetros por segundo. Por lo tanto, nuestro criterio de finalización de iteración es poseer un error absoluto menor a 0.005.

La traducción de esta metodología al código M de MATLAB® se encuentra en el Apéndice F.

Tasa de Evaporación

Tal como lo indica la ecuación (18), la tasa de evaporación K depende de tanto el diámetro de la gota en cada intervalo de tiempo, como también de su velocidad, en forma de la raíz de su producto.

Utilizando una aproximación lineal (ecuación (23)), pudimos aproximar ($R^2 = 0,999$) la raíz a una recta de pendiente y ordenada constante.

De esta forma pudimos expresar la tasa K , a través de la ecuación (24), como:

$$K = q_0 \Delta T (1 + q_1 D)$$

donde q_0 y q_1 son constantes que dependen de parámetros constantes, y la diferencia entre la temperatura ambiente y la de bulbo húmedo (ecuaciones (25) y (26)).

Al ser la temperatura ambiente y la humedad relativa parámetros de entrada, se puede calcular la temperatura de bulbo húmedo mediante el método de la bisección (ver Apéndice C). Por lo tanto, la tasa de evaporación K dependerá únicamente del diámetro de la gota en ese



intervalo de tiempo, siendo el cálculo tan sencillo como el ingreso de los valores de q_0 , q_1 , ΔT y el diámetro D de la gota en ese momento.

El código empleado para calcular dicha tasa para cada valor de D , conjuntamente con el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo se encuentra en el Apéndice F.

Apéndice C: Presión de vapor y humedad

Las moléculas de vapor de agua en la atmósfera aumentan la presión atmosférica. Su contribución a la presión se llama "presión parcial de vapor". Si la atmósfera está saturada con vapor de agua, la presión de vapor parcial se denomina *presión de vapor saturada*. Debido a que la evaporación molecular, así como la velocidad de las moléculas de vapor, dependen fuertemente de la temperatura, la presión de vapor también debe ser fuertemente dependiente de la temperatura.

La presión de vapor saturado para el agua puede describirse acertadamente mediante la siguiente ecuación empírica:

$$P_{vap,sat} = 6,112e^{(17,67T)/(T+243,5)} \quad [HPa] \quad (66)$$

donde T [$^{\circ}C$] es la temperatura ambiente. El primer factor corresponde a la presión de vapor saturada a $0^{\circ}C$.

Como la humedad relativa está definida como la proporción entre presión de vapor parcial y la presión de vapor saturado, podemos establecer la siguiente relación:

$$P_{vap} = \frac{P_{vap,sat}HR}{100} \quad [HPa] \quad (67)$$

De esta forma, podemos calcular la *temperatura de rocío* como:

$$T_r = \frac{243,5 \ln\left(\frac{P_{vap}}{6,112}\right)}{17,67 - \ln\left(\frac{P_{vap}}{6,112}\right)} \quad [^{\circ}C] \quad (68)$$

Adelantándonos al porvenir, esta temperatura de rocío se calcula sólo para tener un valor de semilla coherente que usaremos más adelante. En este caso, necesitaremos dos semillas.

Presentaremos ahora las fórmulas para la presión de vapor de saturación de bulbo húmedo, la presión de vapor húmeda y la diferencia de presión, respectivamente.

$$P_{vap,sat,hum} = 6,112e^{(17,67T_{bh})/(T_{bh}+243,5)} \quad [HPa] \quad (69)$$

$$P_{vap,hum} = P_{vap,sat,hum} - \left(P_{amb}(T - T_{bh}) \cdot 0,00066(1 + (0,00115T_{bh})) \right) \quad [HPa] \quad (70)$$

$$\Delta P = P_{vap} - P_{vap,hum} \quad [HPa] \quad (71)$$

donde T_{bh} es la temperatura de bulbo húmedo.

Al igual que en el caso de la velocidad de sedimentación, topamos un inconveniente. Notar que hasta este momento no calculamos aún a la temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura para la cual ΔP vale 0. Para lograr calcular la diferencia de presión, necesito primero calcular la presión de vapor húmeda. Para calcular la presión de vapor húmeda, requiero el valor de la presión de vapor de saturación de bulbo húmedo, en donde esta última depende de la temperatura de bulbo húmedo para poder calcularse. Entonces, este dilema también se resolverá mediante un método iterativo, pero en este caso utilizaremos el método de la Bisección.

El método de la bisección es un método que se basa en la localización de raíces, es decir, hallar aquel punto en donde la función pasa por 0. En este caso en particular, buscaremos que la ecuación de ΔP (ecuación (71)) pase por 0, o lo más cercano que logremos acercarnos. Anteriormente se mencionó que necesitaríamos dos semillas, en este caso T y T_r (temperatura ambiente y de rocío, respectivamente). Esto es porque el método de la bisección requiere dos extremos, de tal manera que siempre que la función se evalúe en estos extremos, posee signo distinto, es decir, pasa por lados opuestos del eje. Si pasa por lados opuestos del eje, significa que, en algún intervalo entre esos valores, pasa por 0. El valor inicial de prueba T_{prueba} será el valor medio entre las semillas, o sea, $((T + T_r)/2)$. Según el signo de la función evaluada en este valor inicial, cambiaré este valor inicial por uno de las dos semillas. Si la función es positiva en T , y sigue siendo positiva en el valor inicial T_{prueba} , entonces mi semilla ahora será T_{prueba} , por lo que el nuevo valor, llamado valor segundo será $T_{prueba} = (T + T_r)/2$. El proceso se repetirá hasta que la diferencia entre semillas sea menor a un valor estipulado como 0,001. Es decir, hasta que solo exista 0,001°C de diferencia entre las temperaturas de bulbo húmedo calculadas. Entonces, nuestra temperatura de bulbo húmedo definitiva será el promedio entre estos valores finales extremos.

Apéndice D: Varias ecuaciones empíricas

Este apéndice contiene ecuaciones empíricas que pueden usarse para estimar con precisión diversas cantidades, principalmente en función de la temperatura ambiente. La mayoría de estas cantidades varían solo ligeramente en el rango 0-30°C. Por lo tanto, para las estimaciones que no requieran el mayor grado de precisión, los valores de, por ejemplo, 15°C pueden ser una buena opción.

En general, las temperaturas T están en una escala absoluta (escala de Kelvin). A veces, sin embargo, es más conveniente usar la escala de Celsius; las temperaturas en la escala de Celsius se indican con el subíndice C (es decir, T_C).

Se debe tener en cuenta que $T = T_C + 273.15$

Densidad del Aire

Según varios investigadores (R.C., 1986) adaptado para presiones en [Pa] en lugar de [mmHg]:

$$\rho_l = 1,2929 \cdot \frac{273,15}{T} \cdot \frac{B - 0,3783p_v}{1,01325 \cdot 10^5} \quad \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (72)$$

donde B es la presión barométrica y p_v es la presión de vapor parcial (ambos en Pascales). Notar que 1 atmósfera es equivalente a 1,01325*10⁵ Pa. Esto aclara la ecuación anterior: el primer factor (1,2929) es la densidad del aire seco a 0°C y 1 atm, mientras que ambos cocientes que siguen pueden interpretarse como correcciones para la temperatura y para la presión, respectivamente. A 15°C y atm, la densidad del aire varía de 1,218 kg/m³ (aire saturado con vapor de agua; p_v=1710 Pa) a 1,225 kg/m³ (aire seco; p_v=0 Pa).

Densidad del Agua

La tabla siguiente (R.C., 1986) nos da las densidades de agua pura (libre de aire) para distintas temperaturas ambientes.

T_c [°C]	ρ_l [kg/m ³]
0	999,87
3,98	1000,00
5	999,99
10	999,73
15	999,13
20	998,23
25	997,07
30	995,67
35	994,06
40	992,24
45	990,25
50	988,07

Ajustando los resultados a una parábola nos devuelve la siguiente ecuación empírica:

$$\rho_l = 1000 - 0,00653(T_c - 3,98)^2 \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (73)$$

El error es menor a 0,1 kg/m³. Válido para temperaturas entre 0 y 50°C. Notar que 3,98°C es la temperatura en donde el agua tiene la densidad más alta.

Viscosidad del Aire

Weast (R.C., 1986) nos da la siguiente lista de viscosidad del aire:

T_c [°C]	η_a [10 ⁻⁶ Pa.s]
0	17,08
18	18,27
40	19,04
54	19,58

De estos valores, la siguiente ecuación empírica fue deducida:

$$\eta_a = (17,2 + 0,067T_c - 0,0004T_c^2) \cdot 10^{-6} \quad [Pa.s] \quad (74)$$

Coefficiente de Difusión de vapor de agua en aire

Gates (Gates, 1980), nos da la siguiente lista de coeficientes de difusión:

T_c [°C]	D_v [$10^{-6} m^2/s$]
0	21,2
5	22,0
10	22,7
15	23,4
20	24,2
25	24,9
30	25,7
35	26,4
40	27,2
45	28,0

Una ecuación lineal se ajusta adecuadamente ($R^2=0,9997$):

$$D_v = 21,2 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0071 \cdot T_c) \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (75)$$

Esta ecuación es muy similar a la propuesta por Monteith (Monteith, 1990), quien menciona un gradiente de 0,007 en lugar de 0,0071. De todas maneras, investigadores anteriores (Threadgil, 1974) usaban una ley de potencias que resulta dar valores de coeficientes de difusión significativamente más bajos. Error menor a $0,1 \cdot 10^{-6} m^2/s$. Válido para temperaturas entre 0 y 45°C.

Apéndice E: Diseño Conceptual

El siguiente apartado tratará brevemente acerca de un diseño esquemático posible de la torre de enfriamiento. La torre consta de 4 componentes principales:

- La estructura en sí;
- Una bomba;
- Una escalera con jaula;
- 6 atomizadores.

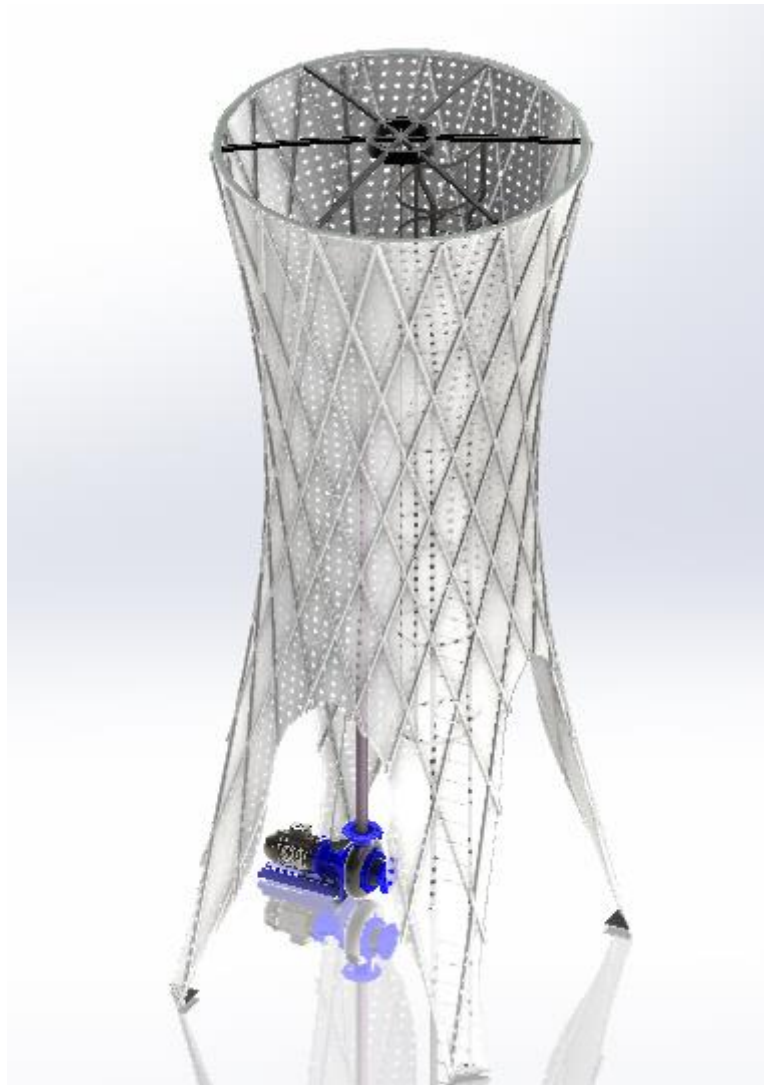


Figura 43: Posible diseño Sistema de Torre de Enfriamiento con bomba de ejemplo, escalera ajaulada para acceso superior y un ejemplo de disposición de cañería

Demás componentes, a los cuales tomaremos como secundarios, pero no menos necesarios son soportes, sistemas de cañería, sistema de soporte eléctrico para el motor de la bomba, entre otros.

Cada componente fue diseñado utilizando SolidWorks®, el cual es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D. Se explicará la razón y algunos detalles de cada componente principal seguidamente.

Dado el alcance de la presente tesis, no se realizó una investigación exhaustiva respecto al modelo y especificación de bomba a usar, ya que eso variaría según el atomizador a usar (ya que cada uno presente una variación de presión al que la bomba debe vencer para lograr bombear el agua), tamaño final de la torre, entre otros detalles técnicos. En términos generales y dados los resultados del modelado y simulación, se precisaría una bomba capaz de bombear aproximadamente 9 litros por hora, lo cual no es una cantidad sustancial.

El fin entonces se lograr impulsar el agua hacia el punto más alto de la torre para luego poder atomizarla. Estándares típicos del proceso sugieren una bomba de alrededor de 1000 PSI, lo cual, en este caso, sería excesivo.

A continuación, se mostrará el diseño de la escalera con caja de seguridad.

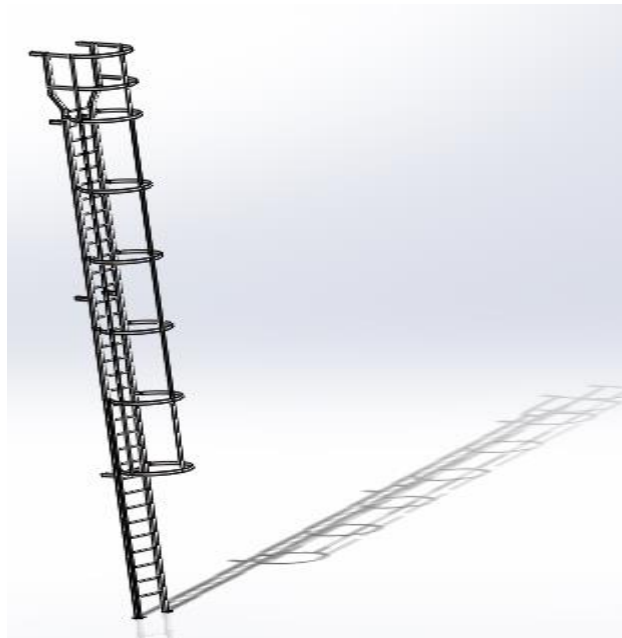


Figura 44: Diseño de escalera con caja de seguridad

En este posible diseño que se postuló, la escalera de acero serviría para poder realizar tanto mantenimiento como acondicionamiento de la unidad. Provee una caja de seguridad para proteger de piezas en caída o una eventual caída.

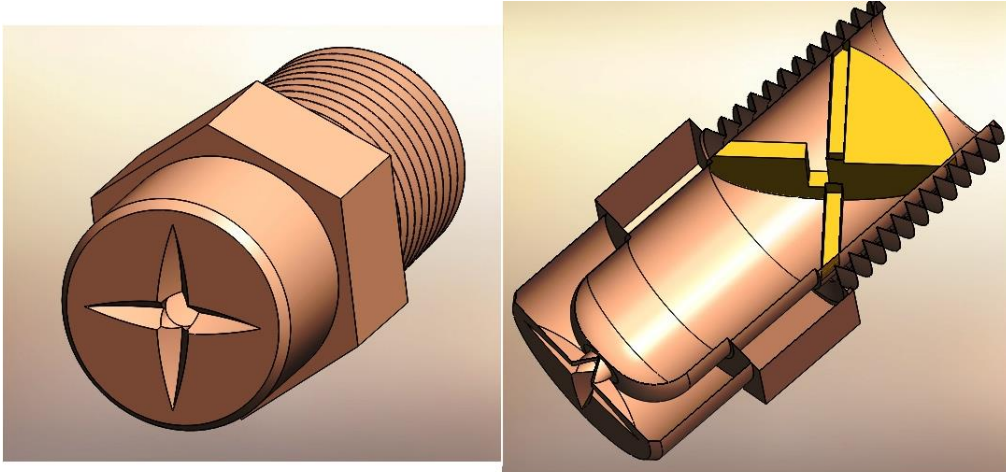


Figura 45: Boquilla de atomizador

Las boquillas de nebulización crean una neblina o niebla muy fina. Las gotas son típicamente lo suficientemente pequeñas como para que la flotabilidad sea significativa en comparación con la gravedad, lo que permite que las gotas parezcan levitar. En realidad, en ausencia de flujo de aire hacia arriba, las partículas simplemente caen muy lentamente.

La alta presión corta el líquido al forzarlo a través de pequeñas aberturas. Un pin de impacto distribuye el líquido a medida que sale de la boquilla, desviándolo en la superficie elegida. Las geometrías comunes de las boquillas de nebulización incluyen espiral, pinzamiento, orificio de pequeño diámetro con una cámara de torbellino, entre otros.

Las boquillas de nebulización generalmente se consideran de ángulo medio (70-90 grados) y con forma de cono. Algunas boquillas experimentarán patrones más estrechos a presiones más bajas. Las boquillas de atomización de aire también se pueden clasificar como boquillas de nebulización en términos de tamaño de gota, sin embargo, la adición de aire de atomización puede ayudar a formar diferentes patrones y aumentar la distancia de proyección.

Las boquillas de nebulización producen las gotitas más pequeñas para la presión directa o boquillas "hidráulicas" de un solo fluido. El tamaño de gota cae en el rango de 20-500 micrones.

Llegando a la torre de enfriamiento en sí, consiste en un alma metálica en forma de hiperboloide. Esta forma es arbitraria. Formas más cerradas harán la corriente de ingreso más lenta y formas más anchas harán ingresar al aire más velozmente.

Como material para la estructura (descontando el alma), se eligió chapa microperforada. Esto es porque permite tanto el traspaso de luz como un soporte adecuado a bajo peso. Otra opción podría haber sido recubrir el alma con tela. Si bien suena poco convencional, esto permitiría una circulación adecuada de las corrientes de recirculación a la vez que permite el traspaso de luz.



Figura 46: Diseño posible propuesto de la Torre de Enfriamiento

A través de SolidWorks®, se intentó lograr un diseño atractivo y a la vez perdurable. La aproximación cilíndrica fue viable gracias a este concepto.

En la parte superior se encuentran un círculo central en donde, al llegarle el agua bombeada, transmitiría esta corriente a 6 boquillas atomizadoras. De esta forma se llevaría a cabo el proceso de refrigeración por evaporación.

Para lograr visualizar lo mencionado, a continuación, se someterá una ilustración de un corte transversal de la estructura.

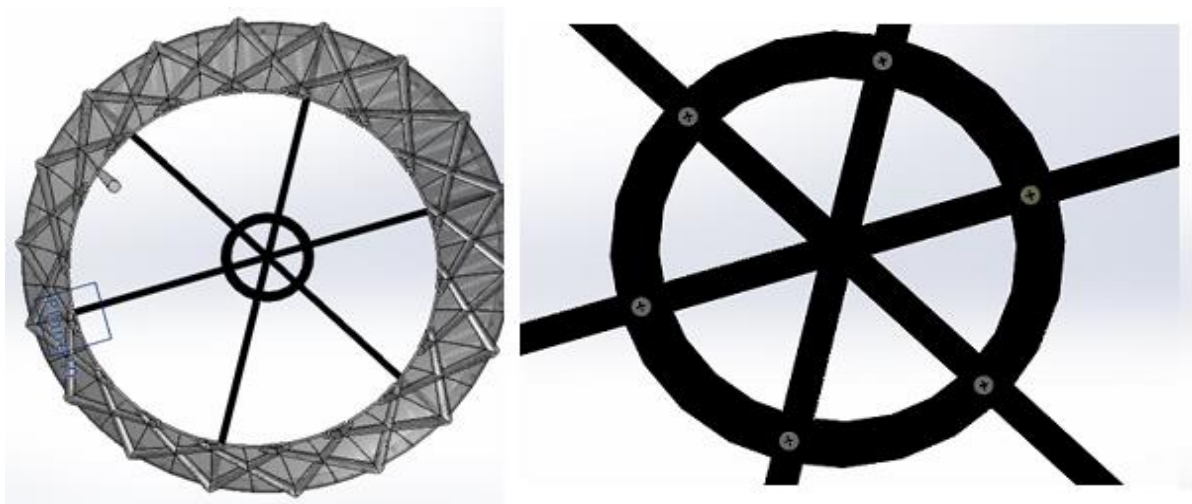


Figura 47: Corte transversal con enfoque en colocación de boquillas

De esta manera se puede lograr un flujo simétrico respecto al eje de revolución de la torre para ser consistentes con lo simulado.



Figura 48: Zona inferior de traslado



Al tomar como sitio de análisis al patio de la Universidad Argentina de la Empresa, el diseño de la torre debería poder acomodar al tránsito del alumnado y personal de la facultad. Para esto, el diseño del pasaje se basó en la funcionabilidad. Su alto es de 4 metros, y el ancho de pie a pie, es de 4 metros. El área total debajo de la torre es de aproximadamente 13m².

Apéndice F: Códigos

En el apéndice presente se añadirán los códigos empleados en MATLAB® para resolver las distintas ecuaciones. Las mismas poseen notas para cada nueva variable introducida de manera de saber qué variables es, y también su unidad de medida.

Tasa de Evaporación

```
function dDdt=tasaDeEvaporacion(D,Tamb,Hrel)

D=D*1e6;
%%%Cálculo de Parámetros de Temperatura Bulbo Húmedo y DeltaT%%%

Pamb=1013; %Presión Ambiental hPa

Pvapsat= 6.112*exp((17.67*Tamb)/(Tamb+243.5)); %Presión de Vapor de
Saturación
Pvap= (Pvapsat*Hrel)/100; %Presión de Vapor
Troc= (243.5*log(Pvap/6.112))/(17.67-log(Pvap/6.112)); %Temperatura de
Rocío

%Cálculo de Temperatura de Bulbo Húmedo con Bisección

Tbulhum1= Troc;
Tbulhum2= Tamb;
Pvapsathum1= 6.112*exp((17.67*Tbulhum1)/(Tbulhum1+243.5)); %Presión de
Vapor de Saturación de Bulbo Húmedo 1
Pvaphum1= Pvapsathum1-(Pamb*(Tamb-
Tbulhum1)*0.00066*(1+(0.00115*Tbulhum1))); %Presión de Vapor Húmeda 1
Pdif1= Pvap - Pvaphum1; %Diferencia de Presión 1
Pvapsathum2= 6.112*exp((17.67*Tbulhum2)/(Tbulhum2+243.5)); %Presión de
Vapor de Saturación de Bulbo Húmedo 2
Pvaphum2= Pvapsathum2-(Pamb*(Tamb-
Tbulhum2)*0.00066*(1+(0.00115*Tbulhum2))); %Presión de Vapor Húmeda 2
Pdif2= Pvap - Pvaphum2; %Diferencia de Presión 2

error = 0.001;
n=1000;

if(sign(Pdif1)==sign(Pdif2))
    disp('No se cumple con la condición Pdif1*Pdif2<0')
end

i=0;
while((abs(Tbulhum2-Tbulhum1)/2)>error&&i<n)
    Tbulhum3=(Tbulhum1+Tbulhum2)/2;
```

```

Pvapsathum3= 6.112*exp((17.67*Tbulhum3)/(Tbulhum3+243.5)); %Presión de Vapor de Saturación de Bulbo Húmedo 3
Pvaphum3= Pvapsathum3-(Pamb*(Tamb-Tbulhum3)*0.00066*(1+(0.00115*Tbulhum3))); %Presión de Vapor Húmeda 3
Pdif3= Pvap - Pvaphum3; %Diferencia de Presión 3
if(sign(Pdif3)==sign(Pdif1))
    Tbulhum1=Tbulhum3;Pdif1=Pdif3;
else
    Tbulhum2=Tbulhum3;Pdif2=Pdif3;
end
i=i+1;
end
Tbulhumdefinitivo=(Tbulhum2+Tbulhum1)/2; %Temperatura de Bulbo Húmedo Definitiva
Pvapsathumdef=
6.112*exp((17.67*Tbulhumdefinitivo)/(Tbulhumdefinitivo+243.5));
DeltaT= Tamb-Tbulhumdefinitivo;

%disp(['La Temperatura de Rocío es:',num2str(Troc) , char(10), ...
%      'La Temperatura de Bulbo Húmedo es:',num2str(Tbulhumdefinitivo), ...
%      char(10), 'DeltaT es:', num2str(DeltaT)]);

%%%Cálculo de Parámetros de Tasa de Evaporación%%%

TambK=Tamb+273.15;
TbulhumdefinitivoK=Tbulhumdefinitivo+273.15;

MasaL=0.018 ; %Masa Molar del agua: 0.018 Kg/Mol

Difvf=21.2e-6 * (1+(0.0071*Tamb)); %Coeficiente promedio de difusión para moléculas de vapor en el film saturado(AproxLin) [m^2/s]
DeltaP2=(Pvapsathumdef-Pvap)*100; %[Pa]
Gamma=0.00066*(Pamb*100)*(1+0.0015*Tamb); %[Pa/K] Pamb*100 para pasar a PA
DeltaP=Gamma*DeltaT ; %ecuación 19 [Pa]

RhoL=1000-0.00653*((Tamb-3.98)^2)+5.2e-7*((Tamb-3.98)^4) ;%Densidad de Gota:[Kg/m^3] (Aprox Lineal)

R= 8.3144 ;%Constante de los Gases: 8.3144 [J/Mol*K]

Tfilm= (Tamb+Tbulhumdefinitivo)/2; %Temperatura Promedio de Film p:42 [C]

TfilmK= Tfilm + 273.15; %[K]

RhoAf=1.2; %Densidad del aire a Temperatura de Film:[Kg/m^3]

ViscAf=1e-6*(17.1+0.067*Tamb-(0.0004*(Tamb^2))); %Viscosidad Dinámica del Aire: [Pa.s] (Aproximación)

a=(4*MasaL*Difvf*DeltaP)/(RhoL*R*TfilmK); %[m^2/s]
b=0.276*((RhoAf)/(ViscAf*(Difvf^2)))^(1/6); %[s^(1/2)/m]
s0=-1.117e-3; %[m/(s^1/2)]

```

```
r0=64.65; %[1/(s^1/2)]
q0=((2*a)/DeltaT)*(1+(b*s0)); %[m^2/(s*K)]
q1=(b*r0)/(1+(b*s0)); %[1/m]

q1b=q1*1e-6;%[1/micrómetro]
q0b=q0/1e-12;%[micrómetro cuadrado/(s*K)]

dDdt=(-q0b*DeltaT*(1+q1b*D))/D;

dDdt=dDdt*1e-6;
```

Velocidad de Sedimentación

```
function Vsed=velSedimentacion(D)

RhoL=999.247;
RhoAf=1.2;
ViscAf=1.8015e-5;
a=24;
d=0.32;
c=0.52;
Grav=9.81;
Viteracion=15;

for i=1:100
Re=(RhoAf*D*Viteracion)/(ViscAf);
Coefdrag2=((a/Re)^c)+(d^c)^(1/c);
Vsed=sqrt((4*RhoL*D*Grav)/(3*RhoAf*Coefdrag2)
if abs(Vsed-Viteracion)>0.005
Viteracion=Vsed;
else
break
end
end
```

Variación del Diámetro

```
function Dvec=calcD(Tambvec,Hrelvec)

global Tamb Hrel V D0 ntercera A l numceldas dz

D = D0;
Vs0=-velSedimentacion(D);
Vtot0=-(V+Vs0);
```



```
t=0;

Vvec=zeros (numceldas,1);
dDdtvec=zeros (numceldas,1);
dtvec=zeros (numceldas,1);
VectorVolumen=zeros (numceldas,1);
Dvec=zeros (numceldas,1);
tvec=zeros (numceldas,1);

for i=1:numceldas
    dDdt=tasaDeEvaporacion (D,Tambvec (i),Hrelvec (i));
    dDdtvec (i)=dDdt;
    Vs=-velSedimentacion (D);
    Vtot=V+Vs;
    Vvec (i)=Vtot;
    dt=(-dz/Vtot);
    dtvec (i)=dt;
    D=max (1e-8,D+dt*dDdt);
    Dvec (i)=D;
    t=t+dt;
    tvec (i)=t;
end
```

Variación de la Temperatura Ambiente y del Sumidero

```
function [Tambvec,Svec]=calcT2 (vgfvec)

global Tamb Hrel V D0 ntercera A l numceldas dz

CalorespA=1000; %Calor específico aire [J/(Kg*K)]
CalorespL=4180; %Calor específico agua [J/(Kg*K)]
CalorlatL=22.6e5; %Calor latente de evaporación [J/Kg]
RhoL=1000;
RhoA=1.2;

Vs0=-velSedimentacion (D0);
Vtot0=(V+Vs0);

flujomasicoA=-V*A*RhoA;
flujomasicoL=-ntercera*Vtot0*A*(4/3*pi*(D0/2)^3)*RhoL;
ConstanteTemperatura=(RhoL*ntercera*Vtot0*CalorlatL*A*(1/flujomasicoA)*(1/CalorespA));

Tambvec=ones (numceldas+1,1)*Tamb;

Svec=ones (numceldas,1);

for i=1:numceldas
    Tambvec (i+1)=ConstanteTemperatura*(vgfvec (i)-vgfvec (i+1))+Tambvec (i);
```

```
Svec(i)=RhoL*ntercera*Vtot0*CalorlatL*(vgfvec(i)-vgfvec(i+1))/dz;
```

```
End
```

Variación de la Humedad Relativa

```
function Hrelvec=calcH(Dvec,Tambvec,vgfvec)

global Tamb Hrel V D0 ntercera A l numceldas dz

R=8.314472/100;    %[m3Pa/ K mol
MasaMolarL=18.02;  %[g/mol
RhoL=1000;        %[Kg/m3

TambK0=273.15+Tamb;

Vs0=-velSedimentacion(D0);
Vtot0=(V+Vs0);

Pvapsat0=6.112*exp((17.67*Tamb)/(Tamb+243.5));
Pvap0=(Pvapsat0*Hrel)/100;
nterceraL0=Pvap0/(R*TambK0);  %[mol/m3
mterceraL0=nterceraL0*MasaMolarL/1000;

Hrelvec=ones(numceldas+1,1)*Hrel;
TambKvec=Tambvec+273.15;
Vtotvec=zeros(numceldas+1,1);
Vtotvec(1)=Vtot0;

mterceraLvec=ones(numceldas+1,1)*mterceraL0;
nterceraLvec=ones(numceldas+1,1)*nterceraL0;
Pvapvec=ones(numceldas+1,1)*Pvap0;
Pvapsatvec=ones(numceldas+1,1)*Pvapsat0;

for i=1:numceldas-1

    Vtotvec(i+1)=-velSedimentacion((Dvec(i)+Dvec(i+1))/2)+V;
    mterceraL2=(Vtot0*ntercera*RhoL*(vgfvec(i)-
vgfvec(i+1))+Vtotvec(i)*mterceraLvec(i))/Vtotvec(i+1);
    mterceraLvec(i+1)=mterceraL2;
    nterceraLvec(i+1)=(1000*mterceraLvec(i+1))/MasaMolarL;
    Pvapvec(i+1)=nterceraLvec(i+1)*R*TambKvec(i+1);

Pvapsatvec(i+1)=6.112*exp((17.67*Tambvec(i+1))/(Tambvec(i+1)+243.5));
    Hrelvec(i+1)=100*(Pvapvec(i+1)/Pvapsatvec(i+1));

end

i=numceldas;
```

```

Vtotvec(i+1)=-velSedimentacion(Dvec(i))+V;
mterceraL2=(Vtot0*ntercera*RhoL*(vgfvec(i)-
vgfvec(i+1))+Vtotvec(i)*mterceraLvec(i))/Vtotvec(i+1);
mterceraLvec(i+1)=mterceraL2;
nterceraLvec(i+1)=(1000*mterceraLvec(i+1))/MasaMolarL;
Pvapvec(i+1)=nterceraLvec(i+1)*R*TambKvec(i+1);

Pvapsatvec(i+1)=6.112*exp((17.67*Tambvec(i+1))/(Tambvec(i+1)+243.5));
Hrelvec(i+1)=100*(Pvapvec(i+1)/Pvapsatvec(i+1));

```

Convergencia

```

clear all;
close all;

global Tamb Hrel V D0 ntercera A l numceldas dz

Tamb=30;
Hrel=50;
RhoA=1.225;
CalorEspA=1000;

V=-1.0; %velocidad de corriente
D0 =60e-6;
ntercera=20000000;

A=1;
l=6; %largo total en [m]
numceldas=60;

dz=l/numceldas; %variación en altura en [m]
divs=10; %Cada cuanto quiero promediar vector
zf=[1:-dz:0]; %para que empiece de 6 (largo) y termine en 0
zc=zf(1:end-1)-dz/2; % idem pero para centros
%zf=[0:-dz:-1]; % asi empieza en 0 y termina en -6 (largo)
%zc=zf(1:end-1)-dz/2; % idem pero para centros
vg0=4/3*pi*(D0/2)^3;

Q=-ntercera*A*vg0*V*1000*3600

Tambvec=ones(numceldas+1,1)*Tamb;
Hrelvec=ones(numceldas+1,1)*Hrel;

for i=1:15
    Dvec=calcD(Tambvec,Hrelvec);
    vgvec=4/3*pi*(Dvec/2).^3; % volumen de gota en la celda
    vgfvec=[vg0; (vgvec(1:numceldas-1)+vgvec(2:numceldas))/2; vgvec(end)];
    [Tambvec,Svec]=calcT2(vgfvec);
    Hrelvec=calcH(Dvec,Tambvec,vgfvec);
    Svec2=Svec/(RhoA*CalorEspA);

```

```
subplot(1,5,1)
plot(Dvec,zc,'g');hold on
subplot(1,5,2)
plot(Tambvec,zf,'r');hold on
subplot(1,5,3)
plot(Hrelvec,zf,'b');hold on
subplot(1,5,4)
plot(Svec,zc,'m');hold on
subplot(1,5,5)
plot(Svec2,zc,'k');hold on
%pause (1)
end

Svec2=Svec/(RhoA*CalorEspA);
subplot(1,5,1)
plot(Dvec,zc,'g','linewidth',2);hold on
title('Variacion de Diametro')
xlabel('Diametro [m]')
ylabel('Altura [m]')
subplot(1,5,2)
plot(Tambvec,zf,'r','linewidth',2);hold on
title('Variacion de Temperatura')
xlabel('Temperatura [°C]')
ylabel('Altura [m]')
subplot(1,5,3)
plot(Hrelvec,zf,'b','linewidth',2);hold on
title('Variacion de Humedad Relativa')
xlabel('Humedad Relativa [%]')
ylabel('Altura [m]')
subplot(1,5,4)
plot(Svec,zc,'m','linewidth',2);hold on
title('Variacion de Sumidero')
xlabel('Sumidero [W/m^3]')
ylabel('Altura [m]')
subplot(1,5,5)
plot(Svec2,zc,'k','linewidth',2);hold on
title('Variacion de Parametro openFOAM')
xlabel('Sumidero [T/s]')
ylabel('Altura [m]')

Svec3=arrayfun(@(j) mean(Svec2(j:j+divs-1)),1:divs:length(Svec2)-
divs+1); %Lo que pide openFOAM
```

Bibliografía

- Belarbi R, G. C. (2006). *Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings.*
- Holterman H, J. (2003). *Kinetics and evaporation of water drops in air*
- Bertoli C, M. n. (1999). *A finite conductivity model for diesel spray evaporation computations.*
- Chen YC, P. N. (1996). *The detailed flame structure of highly stretched turbulent premixed methane-air flames. Combustion and Flame.*
- Eck, B. (1961). *Technical Fluid Mechanics.*
- Gates, D. M. (1980). *Biophysical ecolog.*
- Goering, C. B. (1972). *Mathematical modeling of spray droplet deceleration and evaporation.*
- Graham-Bryce, H. y. (1980).
Industrial Mist System - Greenhouse . (2017). Obtenido de
<http://www.archiexpo.com/prod/shresth-import-export/product-65375-561523.html>
- Lefebvre, A. (1989). *Atomization and sprays.*
- Marshall, R. (1952). *Evaporation from drops; Part I & II.*
- McDowall, R. (2006). *Fundamentals of HVAC Systems.*
- Monteith, J. U. (1990). *Principles of environmental physics.*
- National Fire Protection Association. (2015). NFPA 750 Standard on water mist fire protection systems.
- Numberger FV, M. G. (1976). *Microenvironmental modification by small water droplet evaporation. Journal of Applied Meteorology.*
- PHIREX Melbourne Water Mist Fire Extinguishing Systems.* (2012). Obtenido de
<http://phirexmelbourne.com/>
- Qureshi M, Z. C. (2006). *Gas entrainment in an evaporating spray jet. Int J Heat Mass Transfer.*
- R.C., W. (1986). *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 67th Edition.*
- Ranz W E & Marshall W R, J. (1952). *Evaporation from Drops. Part I & II.*
- RJ, E. (1985). *Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzle.*
- Rouault M, M. P. (1991). *A Model of Evaporating Spray Droplet Dispersion. J Geophys Res*
96: 7181-7200.

Salas, L. M. (s.f.). *Solución del problema de convección utilizando volumen finito y algoritmos paralelos.*

Threadgil, W. (1974). *A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying.*

Versteeg, H. K. (1995). *Computational Fluid Dynamics.*

Wang, Z. (2013). *OPTIMIZATION OF WATER MIST DROPLET SIZE IN FIRE SUPPRESSION BY USING CFD MODELING.*