

**ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE ENERGÍA, DE TIPO  
LATENTE, POR MEDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIELO**



**DUVÁN CAMILO SOTO UMAÑA  
201520041602**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

**ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE ENERGÍA, DE TIPO  
LATENTE, POR MEDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIELO**

**DUVÁN CAMILO SOTO UMAÑA**

**Proyecto de grado para optar al título de ingeniero mecánico**

**Director: Víctor Manuel Carrillo Álvarez**

**Ingeniero Mecánico MSc en Didáctica de las Ciencias**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
BOGOTÁ D.C.**

**2019**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Fundación Universitaria Los Libertadores para optar al título de Ingeniero Mecánico**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Bogotá D.C., 23 de Septiembre de 2019**

## DEDICATORIA

Han pasado muchos años desde el día que nací, desde entonces ustedes han estado hay para apoyarme y brindarme lo mejor con el paso del tiempo, con esfuerzo, sacrificio y dedicación sin importar que tan difícil sea su trabajo siempre me han dedicado tiempo para escucharme y apoyarme en cada una de las dificultades que se me han presentado a lo largo de la vida, por lo cual alcanzar el título de Ingeniero Mecánico no es solo una victoria mía sino de ustedes muchas gracias padres.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la primera persona que le quiero agradecer es a Dios, posteriormente a mi director del proyecto de grado Víctor Manuel Carrillo Álvarez, pues sin su ayuda y conocimiento sobre esta temática no habría sido posible alcanzar este objetivo, también quiero agradecerle a todos los profesores y directivos del programa de Ingeniería Mecánica de la Fundación Universitaria Los Libertadores los cuales me han aportado su conocimiento desde el día que llegue a la institución lo cual me permitió crecer como persona por lo cual los catalogo no solo mis profesores sino mis amigos.

## **TABLA DE CONTENIDO**

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
2. JUSTIFICACIÓN.....	12
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	13
4. MARCO REFERENCIAL .....	14
4.1 ANTECEDENTES EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA .....	16

## **TABLAS**

Tabla 1. Cálculos de Q en unidades de Btu/h, vatios con agua pura

Tabla 2. Cálculos de Q en unidades de Btu/h, vatios con Etilenglicol al 30%

Tabla 3. Cálculos de Q en unidades de Btu/h, vatios con Etilenglicol al 50%

Tabla 4. Densidad de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 30%

Tabla 5. Densidad de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 50%

Tabla 6. Entalpía de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 30%

Tabla 7. Entalpía de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 50%

## GRÁFICAS

Gráfica 1. Comparación datos entre Btu/h y vatios con relación al caudal con agua pura

Gráfica 2. Comparación datos entre Btu/h y vatios con relación al caudal con Etilenglicol al 30%

Gráfica 3. Comparación agua pura y Etilenglicol al 30% en Bogotá

Gráfica 4. Comparación datos entre Btu/h y vatios con relación al caudal con Etilenglicol al 50%

Gráfica 5. Agua pura vs agua con Etilenglicol al 50% en Bogotá

Gráfica 6. Densidad de la solución al 30% Etilenglicol

Gráfica 7. Densidad de la solución al 50% Etilenglicol

Gráfica 8. Entalpía de la solución al 30% Etilenglicol

Gráfica 9. Entalpía de la solución al 50% Etilenglicol

## FIGURAS

Figura 1. Estructura sistema de acumulación de energía mediante la formación de hielo

Figura 2. Distribución ductos de ventilación y partes que conforman el sistema

Figura 3. Simulación de  $Q$  en Matlab

Figura 4. Simulación de Densidad de la solución en Matlab

Figura 5. Simulación de delta calidad en la solución en Matlab

Figura 6. Simulación delta de Entalpía en la solución en Matlab

Figura 7. Simulación Entalpía del líquido portador en Matlab

Figura 8. Simulación Entalpía del líquido portador en Matlab

Figura 9. Resultados simulación Entalpía del hielo en Matlab

Figura 10. Resultados simulación Entalpía del Etilenglicol al 30% en Matlab

Figura 11. Resultados simulación Entalpía del Etilenglicol al 50% en Matlab

## INTRODUCCIÓN

El almacenamiento térmico de energía, sobre todo mediante el uso y producción de hielo es importante para la comunidad académica y cualquier otro ente investigativo, ya que es una tecnología que con el pasar de los años ha presentado grandes avances y buenos resultados en diferentes lugares como oficinas, escuelas, hospitales, centros comerciales y en aplicaciones principalmente relacionadas con la climatización y el aire acondicionado, debido a que es una buena alternativa para reducir el consumo de energía eléctrica favoreciendo aspectos tanto económicos como ambientales en donde empresas como BAC[1] o IceEnergy[2] han venido siendo exponentes de estos avances.

En el presente trabajo se seleccionaron algunos artículos científicos que mediante diversos programas computacionales simulan el comportamiento de esta fuente alterna de energía, se seleccionó el artículo de simulación en TRNSYS (Transient System Simulation Program) [26] como guía para realizar este procedimiento en el software MATLAB utilizando etilenglicol al 30 y 50% respectivamente en la ciudad de Bogotá y se calcularon sus propiedades termodinámicas más representativas como densidad, entalpías, potencia generada, entre otras, las cuales permitirán conocer la viabilidad de implementar esta tecnología en algún sector de la ciudad.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso excesivo del aire acondicionado en los centros comerciales, edificios, casas, etc. Ha conllevado a incrementar de manera significativa el gasto energético en las grandes ciudades como Cali, Medellín y Bogotá debido a ello se busca implementar un sistema de almacenamiento térmico de energía mediante la producción de hielo para disminuir el porcentaje del gasto energético.

El uso de aire acondicionado alimentado con fuentes de energía convencionales genera un alza en el costo energético, las emisiones de dióxido de carbono también son un aspecto preocupante pues como ingeniero una de las metas es disminuir los riesgos medioambientales, por lo cual es un tema de alto impacto social en nuestra comunidad

La contaminación ambiental tendrá un incremento anual significativo si no se toman acciones a tiempo y el costo energético generara grandes pérdidas en las industrias donde las personas más afectadas serán los habitantes del común pues en las grandes ciudades el índice de dióxido de carbono es muy alto y esto a su vez está generando enfermedades pulmonares a tempranas edades.

El Ministerio de Ambiente, UPME (Unidad de Planeación Minero Energéticas) con los organismos de control encargados de observar todo lo relacionado con las emisiones y demás factores que dañan el buen vivir de la sociedad.

ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación), RETIQ (Reglamento Técnico de Etiquetado) son los encargados de las normas de uso de máquinas que utilicen energía eléctrica.

La solución a este problema es la implementación de un almacenador de energía térmica el cual acumule energía durante el día para apagar los motores de noche y que este funcione con la energía acumulada mediante el hielo mezclado con otros compuestos químicos.

¿Cuál es la viabilidad para implementar un sistema de almacenamiento térmico de energía, por medio de la fabricación de hielo?

## **2. JUSTIFICACIÓN**

En la vida cotidiana nos encontramos con sistemas de aires acondicionados implementados de manera masiva; por tal motivo, es necesario buscar alternativas que ayuden a disminuir el gasto energético mediante un sistema que acumula agua helada mezclada con un porcentaje de Etilenglicol para utilizarlo como base del funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado. Al finalizar este proyecto, se busca proponer una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y del gasto energético; además de esto, se disminuye la emisión de sustancias agotadoras de la capa de ozono, debido a que la cantidad de refrigerante en el sistema es mínima comparada con los sistemas convencionales porque se centraliza la operación en un cuarto de máquinas lo que conlleva a una reducción de la masa de refrigerante utilizada; es así como lo que circula por las tuberías es mezcla de agua con Etilenglicol y no refrigerante.

### **3. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **Objetivo General**

- Comparar la eficiencia térmica de sistemas de almacenamiento de energía latente mediante hielo para disminuir el gasto energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### **Objetivos específicos**

- Determinar las variables que están inmersas en la tecnología de almacenamiento térmico de energía con hielo
- Simular en un programa CFD (Computational Fluid Dynamics) el prototipo sistemas de acumulación de energía latente por medio de la elaboración de hielo.
- Realizar la comparación entre dos sistemas de almacenamiento de energía que contienen diferentes porcentajes de mezcla agua Etilenglicol.

#### **Metodología**

- Revisión estado del arte de acumulación de energía de tipo latente mediante la producción de hielo, con el fin de obtener los modelos implementados hasta ahora que utilizan este tipo de tecnología.
- Determinación de las variables que se involucran en el diseño de equipos para acumulación de energía latente de baja entalpía con el fin de involucrarlas en los diseños propuestos.
- Simulación de la maquinaria basados en teorías termodinámicas y de refrigeración utilizando para esto paquetes informáticos que simulen los procesos, para de esta manera proyectar los resultados que se van a obtener.

#### 4. MARCO REFERENCIAL

Desde la antigüedad el hombre ha decidido utilizar el hielo como una solución para enfriar en los días calurosos, Platón menciona que en aquella época se almacenaba el hielo mediante aislamiento térmico para refrescarse en los días calurosos de verano.[3]

A través del paso de los años y debido al cambio climático del planeta algunas zonas como Norteamérica, norte de Europa y China se han visto en la necesidad de implementar sistemas de refrigeración distintos a los convencionales, una muestra clara de ellos son los sistemas de acumulación de energía latente a baja entalpia mediante la formación de hielo[4], por otro lado los sistemas CCHP (sistemas combinados de enfriamiento, calor y energía) están a la vanguardia de los avances tecnológicos tanto a nivel académico como industrial, de estos modelos podemos utilizar entre un 75-80% de su energía eléctrica y térmica producida [5].

Debido a los altos índices de consumo energético a nivel mundial la generación de energía mediante celdas fotovoltaicas, energía eólica, centrales eléctricas, entre otras ven como una buena alternativa los sistemas TES (Almacenamiento de energía térmica) los cuales pueden ayudar a suplir el consumo durante las horas valle ya sea con soluciones salinas o con mezclas de diversos alcoholes.[6]

Otra aplicación de la acumulación de energía mediante la formación de hielo es servir como fuente de energía para calefacción de una piscina la cual consta de un reservorio para acumular el hielo y una bomba de calor la cual funciona a base de agua helada para revertir el ciclo de refrigeración calefacción mediante esta máquina y así disminuir el consumo energético considerablemente. [7]

La formación de hielo no solo se ha implementado en sistemas de refrigeración también ha sido útil para aumentar la potencia y la eficiencia en las turbinas de gas permitiendo refrigerar el aire que entra al compresor, la densidad del aire y en caudal másico permiten que la turbina sea más eficiente aumentando su eficiencia de un 2.1 a un 5.2% y aumentando su potencia de 3,9 a 25.7% lo cual optimiza este proceso de manera adecuada en las zonas industriales.[8]

Luego de ello aparecieron los sistemas TES ha sido un tema de vital interés en los últimos años donde cabe resaltar sus campos de aplicación respecto a la acumulación de energía solar, suministro de energías en lugares comunes como hospitales y edificios mediante reservorios de sustancia líquidas para posteriormente generar energía.[9] En países como Malasia el consumo energético en las oficinas y zonas industriales abarca un 25% del consumo total por lo cual, fue necesario realizar un estudio que permitiera disminuir este consumo donde la mayor alternativa o solución fue la acumulación de energía térmica en frío, para caracterizar estos sistemas es necesario tener en cuenta el dimensionamiento del reservorio, área a refrigerar, entre otros factores que influyen.[10][11]

En procesos como la solidificación de hielo para TES es necesario tener en cuenta la rugosidad y el ángulo de incidencia con la superficial del material realizando una comparación entre el aluminio, latón y cobre por lo cual se consideró pertinente aumentar la rugosidad del material cuando se utilice aluminio y cobre para que el procedimiento de

descongelamiento sea más lento y esto a su vez ayude a mantener frío el sistema durante un mayor tiempo para disminuir significativamente el gasto energético.[12]

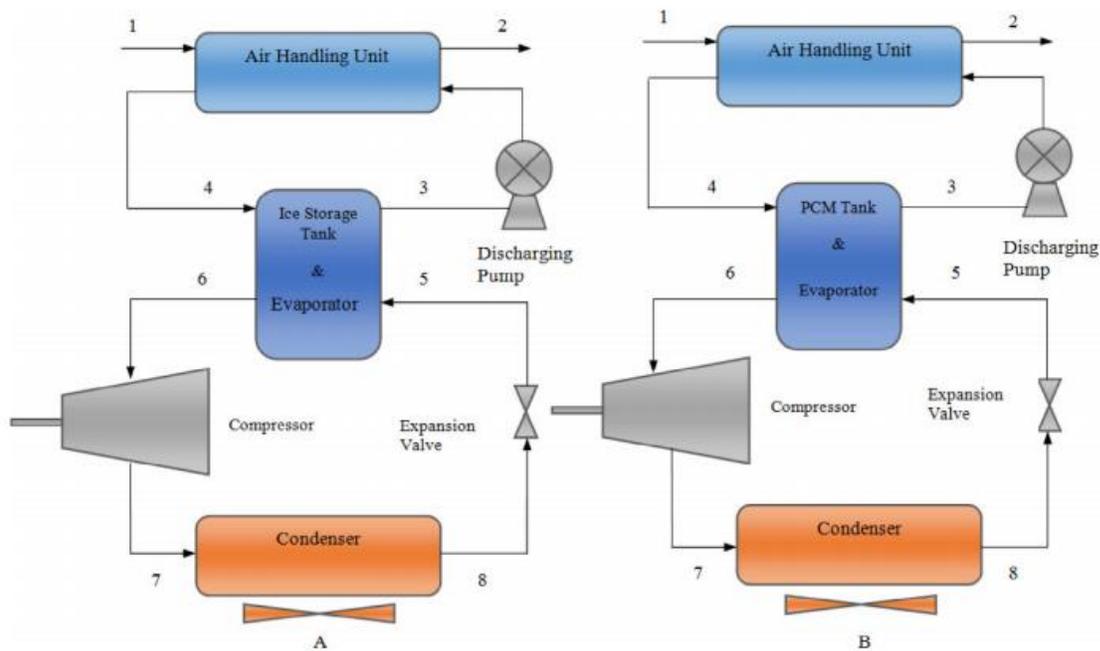
Los sistemas de almacenamiento térmico HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) son optimizados mediante la acumulación de energía mediante la formación de hielo y logrando reducir los costos de energía, se realizó una comparación con tres anillos hechos de acero inoxidable, magnesio y aluminio donde se logró concluir que el grosor de estos anillos se recomienda sea de 0,25mm para permitir que el enfriamiento se realice lo más rápido posible pues al aumentar el espesor el tiempo de congelación aumenta considerablemente.[13]

Realizar una comparación entre el consumo de energía en horas pico a pico entre sistemas convencionales de refrigeración y sistemas de acumulación de energía mediante hielo permitió determinar que la formación de hielo aumenta el consumo energético debido a que el motor debe funcionar durante las 24 horas del día pero su beneficio se basa en el ahorro producido durante las horas valle debido a que disminuye casi en su totalidad el consumo de energía por lo cual se considera una buena alternativa para implementar en zonas costeras debido a que en zonas con alta humedad relativa la carga de refrigeración es mayor y dificulta esta labor por lo cual disminuye la eficiencia.[14]

A su vez Los sistemas ITSS (Sistemas de almacenamiento térmico de hielo de circulación forzada) son sistemas implementados en China los cuales solucionan las emergencias en minas de carbón diseñando mecanismos que funcionen sin necesidad de la energía eléctrica en caso de una emergencia, dimensionando y realizando los cálculos pertinentes de transferencia de calor por los fenómenos de conducción y convección en las tuberías y demás variables a tener en cuenta para calcular de manera óptima las necesidades[15], de otro lado el consumo de energía en horas pico, género en países como España, Irlanda y Alemania la necesidad de utilizar los sistemas ITES (Ice Thermal Energy Storage) teniendo en cuenta si la sustancia utilizada fue una solución acuosa, salina o mezcla con alcohol lo cual genera un cambio en las propiedades termodinámicas típicas como densidad, calor específico, entre otras, logrando obtener la conclusión de que utilizar estas opciones de almacenamiento de energía permitirá ahorrar costos del consumo producido en horas pico apagando este sistema en horas valle para funcionar sin generar consumo eléctrico.[16]

Los elementos que constituyen la máquina para producción de energía mediante hielo a base de agua y etilenglicol presenta una estructura donde su principio básico de funcionamiento es el ciclo convencional de refrigeración y otras partes que las podemos apreciar en la siguiente figura que está compuesta por condensadores, evaporadores, compresores, válvulas de expansión, reservorio del hielo y ductos de ventilación tanto de entrada como de salida.

**Figura1. Estructura sistema de acumulación de energía mediante la formación de hielo**



[17]

**Fuente:** [17] M. Hoseini Rahdar, A. Emamzadeh, and A. Ataei, "A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 96, pp. 391–399, 2016.

La acumulación de energía no siempre será utilizada para refrigerar hay ocasiones que se usa como calefacción según el entorno de trabajo luego de realizar un estudio se consideraba que la formación de hielo era lineal lo cual no es cierto pues según este análisis realizado la tasa de formación disminuye a medida que este se solidifica por lo cual el tiempo para generar el cubo de hielo aumenta y se ve directamente afectado por las condiciones del entorno en que se encuentre.[18]

El uso de la energía mediante la formación de hielo generalmente se usa en hospitales en horas pico y la formación del hielo se presenta en horas valle pues el hielo durante de alto consumo energético se usa para disminuir la temperatura dentro de las instalaciones y al utilizar las duchas de agua fría se formara el hielo lo cual es completamente opuesto al funcionamiento en los centros comerciales o hoteles.[19]

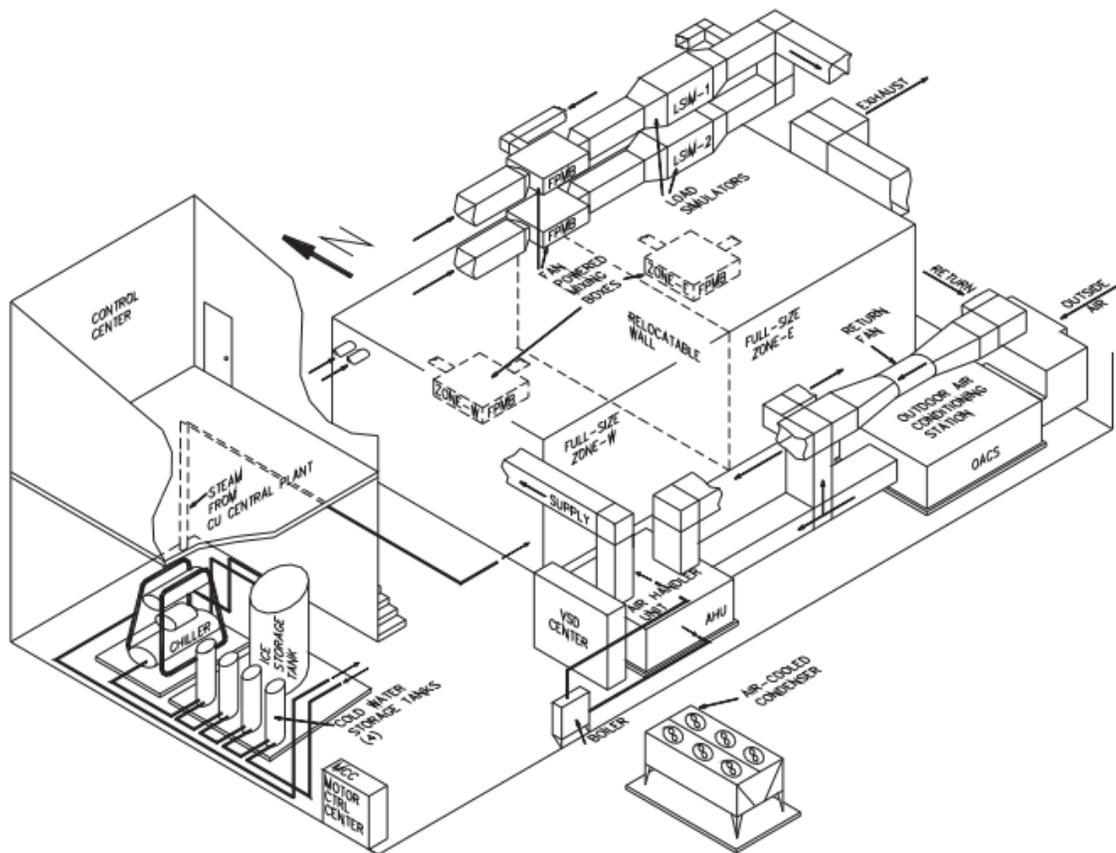
#### 4.1 ANTECEDENTES EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para realizar y determinar las variables que analizare en la simulación seleccione algunos artículos los cuales me aportaron la siguiente información teniendo en cuenta la creciente demanda del rendimiento energético.

El Soltan y Ardehali en 2003, analizaron la solidificación en una tubería circular teniendo en cuenta los diámetros interno y externo a partir de las coordenadas esféricas y teniendo en cuenta los fenómenos de conducción, convección y demás factores que afectan las superficies del sistema, su desarrollo se realizó mediante derivadas parciales para disminuir el número de incógnitas y posteriormente determinar el delta de temperatura y ángulos asumiendo algunos valores de temperatura exterior para determinar un tiempo aproximado de congelación del fluido .[20][21]

Xie y Yuan (2016) trataron en su artículo lo relacionado con la simulación de la carga térmica en un edificio teniendo en cuenta parámetros como los materiales de construcción, horarios operativos, cantidad de personas dentro de las instalaciones y condiciones meteorológicas y valores estándar de consumo energético y realizando una distribución de los ductos de ventilación y demás partes que conforman la zona de trabajo los cuales los podemos ver a continuación en la siguiente imagen

**Figura 2. Distribución ductos de ventilación y partes que conforman el sistema.**



**Fuente:** [22] A. Hajiah and M. Krarti, "Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass - Part I: Simulation environment," *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 499–508, 2012.

Luego de realizar los cálculos pertinentes mediante balances termodinámicos se obtuvo la conclusión que al utilizar la acumulación de energía de tipo latente mediante hielo se logró disminuir en un 13,2% el consumo mensual de electricidad.[22]

Se realizó una simulación en una planta de enfriamiento comercial con sistemas de almacenamiento de hielo, teniendo en cuenta las siguientes estructuras para su análisis: diversos tipos de compresores, enfriadores y tipos de edificios basándose en tres parámetros relevantes para los cálculos que fueron: variar las cargas eléctricas teniendo en cuenta la

densidad y la potencia, excluir los perfiles de carga de refrigeración e ignorar los efectos transitorios del cambio de estado de líquido a sólido para que la simulación sea más sencilla generando 360 combinaciones llegando a la conclusión de que la velocidad de congelación y la eficiencia en la formación del hielo son las dos variables más relevantes para calcular el valor del pico a pico de energía.[23]

Otro método para el análisis de la acumulación de energía mediante la formación de hielo es realizar un estudio mediante el método de celosía de Boltzmann de dos fluidos teniendo en cuenta factores como la viscosidad cinemática y coeficiente de colisión cruzada teniendo en cuenta seis parámetros numéricos los cuales fueron: 1) Sistemas de aire acondicionado con almacenamiento en frío 2) Materiales de cambios de fase sólido-líquido los cuales absorben y liberan energía térmica, 3) saber si el almacenamiento es estático o dinámico, 4) Desarrollar un modelo en PC para comparar este sistema de hielo vs el convencional, 5) construir un depósito para realizar las pruebas experimentalmente con el hielo y 6) realizar la simulación funcionando la calefacción, refrigeración y plantas de energía de forma simultánea obteniendo como conclusión que la viscosidad del fluido es la principal variable a controlar en las futuras simulaciones.[24]

Mediante el método de Newton-Raphson se realizó una simulación teniendo en cuenta la caída de presión, caudal del sistema y requisitos de caudal en cada transferencia de energía, mediante el cálculo hidráulico y la simulación de las redes mediante elementos finitos logrando concluir que los ITES tienen un límite aceptable del 18,2% en comparación con las redes de los sistemas de refrigeración convencionales y a su vez logrando disminuir los diámetros de las tuberías para obtener una mayor eficiencia.[25]

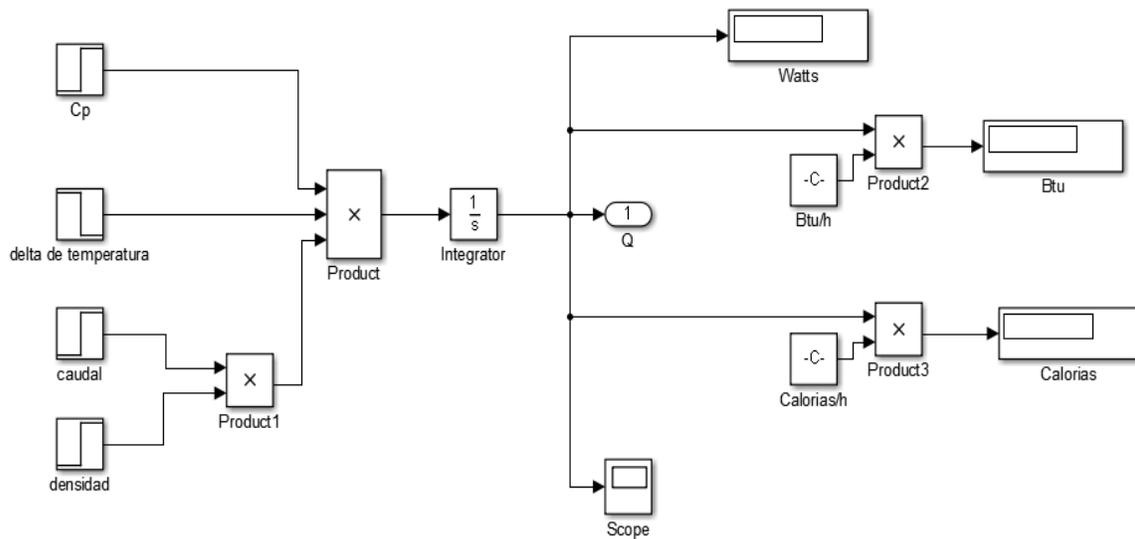
En Malaysia se realizó una simulación en el programa TRNSYS debido a su clima tropical donde es necesario que la gran mayoría de los edificios y centros comerciales tengan sistemas de aire acondicionado los cuales consumen un 64% de la energía total por lo cual es necesario buscar alternativas para reducir los costos energéticos donde una de las soluciones más óptimas es la acumulación de energía mediante la formación de hielo realizando la mezcla entre el agua con un porcentaje del 30 o 50% de etilenglicol y analizar cada una de las propiedades y su comportamiento a ciertas temperaturas.[26]

## **METODOLOGÍA**

Para la simulación de la acumulación de energía de tipo latente mediante la formación de hielo luego de leer y analizar cada uno de los artículos se seleccionó el artículo de simulación en TRNSYS [26] el cual permitió calcular las propiedades representativas del uso del etilenglicol con porcentajes que oscilan entre el 30 al 100% en volumen de la mezcla.

$Q = \dot{m} C_p \Delta T$  (1)  
 $\dot{m} = \text{caudal} * \text{densidad}$   
 $C_p = \text{calor específico}$   
 $\Delta T = \text{Diferencia de temperatura}$

**Figura 3. Simulación de Q en Matlab**



$$P_{sl} = \frac{1}{\frac{X_{ice}}{\rho_{ice}} + \frac{1-X_{ice}}{\rho_{cf}}}$$

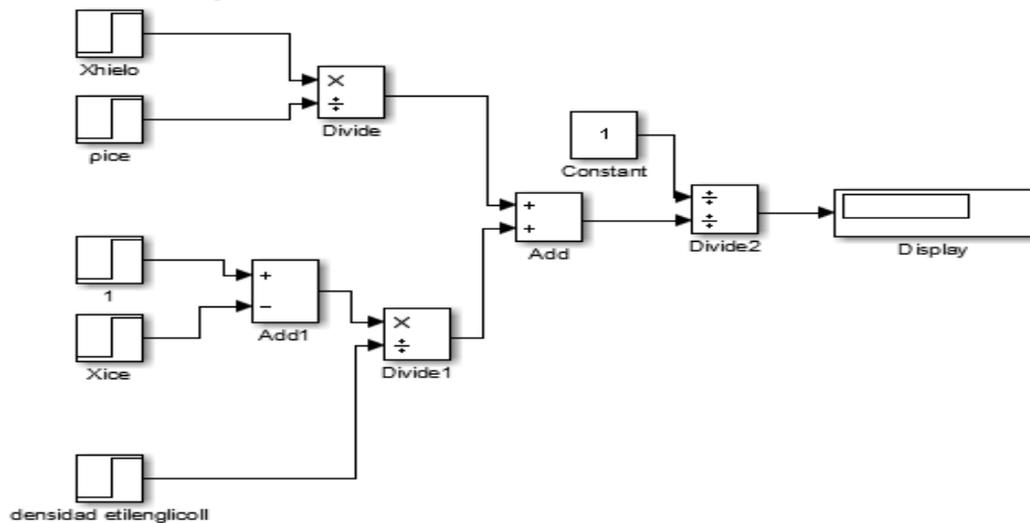
$P_{sl}$  = Densidad de la suspensión de hielo

$X_{ice}$  = Fracción de peso del hielo

$\rho_{ice}$  = Densidad del hielo

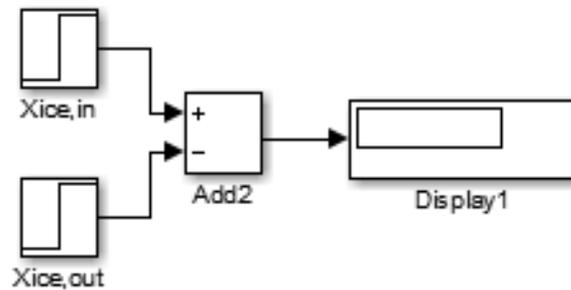
$\rho_{cf}$  = Densidad del líquido portador evaluado a la temperatura de la suspensión de hielo (Etilenglicol)

**Figura 4. Simulación de Densidad de la solución en Matlab**



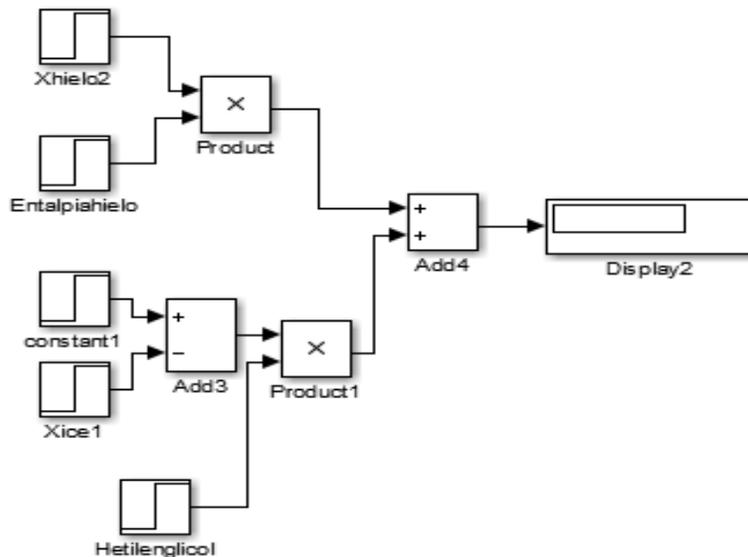
$\Delta X_{ice} = X_{ice,in} - X_{ice,out}$   
 $\Delta X_{ice}$  = Delta de calidad del hielo  
 $X_{ice,in}$  = Calidad hielo en la entrada  
 $X_{ice,out}$  = Calidad hielo en la salida

**Figura 5. Simulación de delta calidad en la solución en Matlab**



$h_{sl} = X_{ice} h_{ice} + (1 - X_{ice}) h_{cf}$   
 $h_{sl}$  = Diferencia de entalpia de la solución de hielo  
 $X_{ice}$  = Fracción de peso del hielo  
 $h_{ice}$  = Entalpia del hielo  
 $h_{cf}$  = Entalpia del líquido portador (Etilenglicol)

**Figura 6. Simulación delta de Entalpía en la solución en Matlab**



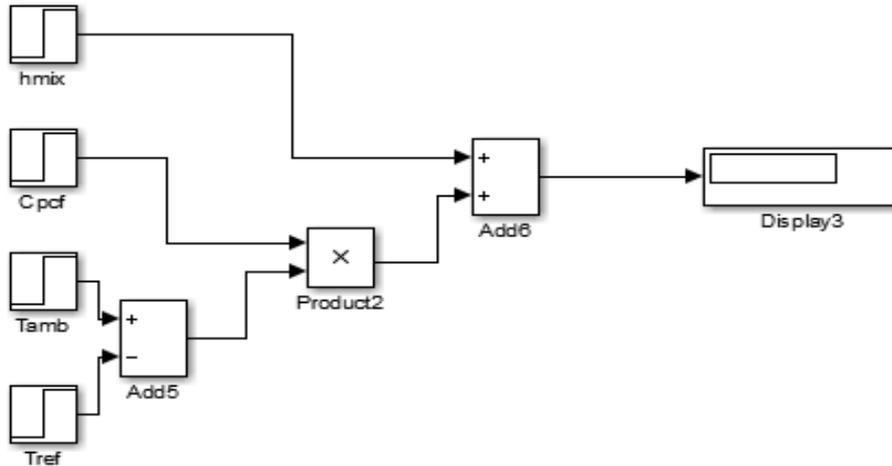
$h_{cf} = \Delta h_{mix} + Cp_{cf}(T - T_{ref})$   
 $h_{cf}$  = Entalpia del líquido portador (Etilenglicol)  
 $\Delta h_{mix}$  = Entalpia de mezclar la solución actual

$Cp_{cf}$ =Calor específico del fluido portador (Etilenglicol)

$T_{ref}$ =Temperatura de congelación de la sustancia

T=Temperatura ambiente

**Figura 7.Simulación Entalpía del liquido portador en Matlab**



$$h_{ice} = -Hf_{ice} + Cp_{ice}(T - T_{ref})$$

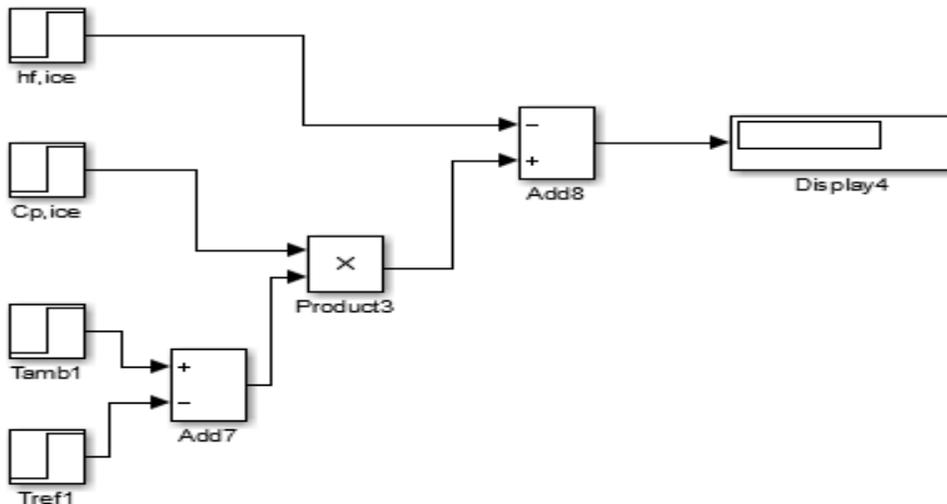
$Cp_{ice}$ = Calor específico del hielo

$Hf_{ice}$ =Entalpía del hielo

$T_{ref}$ =Temperatura de congelación de la sustancia

T=Temperatura ambiente

**Figura 8.Simulación Entalpía del hielo en Matlab**



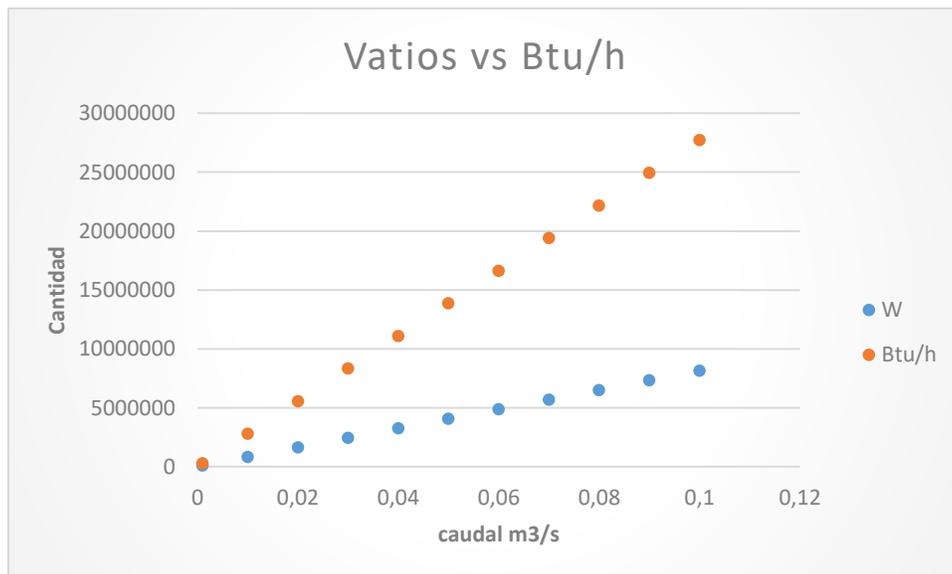
## DATOS OBTENIDOS PRIMERA SIMULACIÓN

Para la primera simulación seleccione la ciudad de Bogotá con una temperatura promedio de 20°C para calcular el Q con cambios en su densidad y composición del fluido completamente con agua y con etilenglicol al 30% y 50% respectivamente obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 1. Cálculos de Q en unidades de Btu/h, vatios con agua pura**

caudal	W	Q
		Btu/h
0,001	81175,6266	276979,356
0,01	811756,266	2769793,56
0,02	1623512,53	5339587,11
0,03	2435268,8	8309380,67
0,04	3247025,07	11079174,2
0,05	4058781,33	13848967,8
0,06	4870537,6	16618761,3
0,07	5682293,86	19388554,9
0,08	6494050,13	22158348,5
0,09	7305806,4	24928142
0,1	8117562,66	27697935,6

**Gráfica 1. Comparación datos entre Btu/h y vatios con relación al caudal con agua pura**



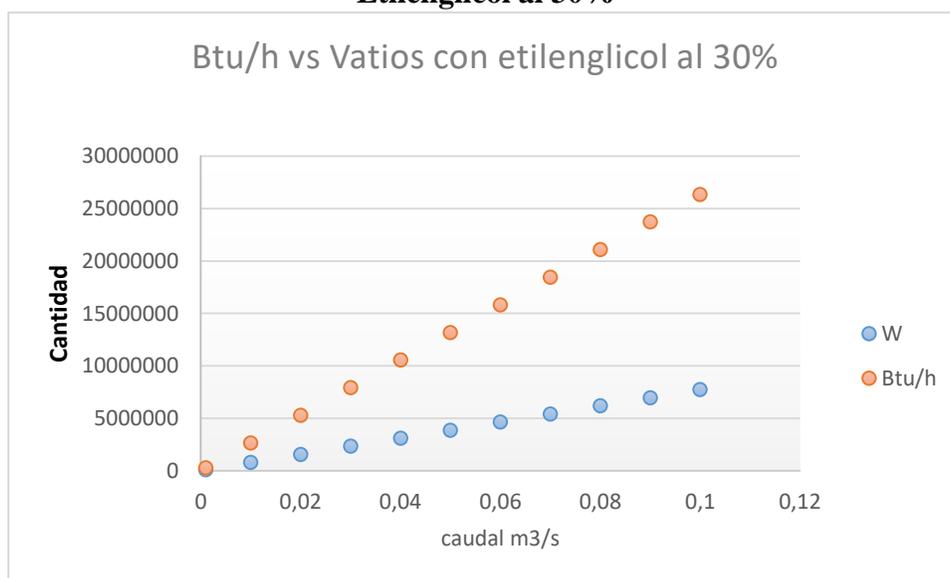
Como se puede observar en la gráfica anterior tanto los datos de Btu/h y Vatios son crecientes al aumentar el caudal a lo largo del tiempo cuando se utiliza agua pura, pero podemos observar que los Watts tienen un valor mucho más elevado en relación a los Btu/h.

Datos con etilenglicol al 30% a 20°C en Bogotá

**Tabla 2. Cálculos de Q en unidades de Btu/h, vatios con Etilenglicol al 30%**

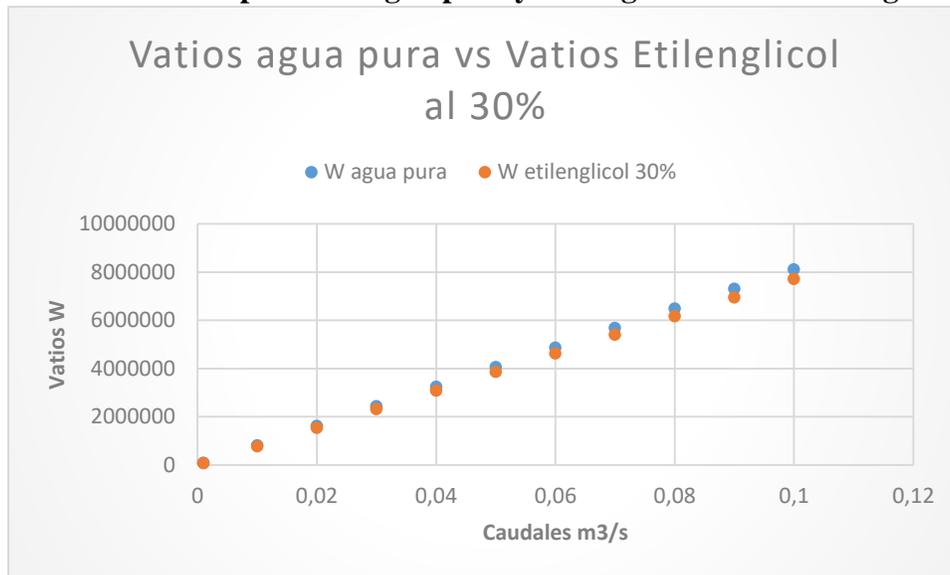
caudal	W	Q
		Btu/h
0,001	77211,457	263453,212
0,01	772114,57	2634532,12
0,02	1544229,14	5269064,25
0,03	2316343,71	7903596,37
0,04	3088458,28	10538128,5
0,05	3860572,85	13172660,6
0,06	4632687,42	15807192,7
0,07	5404801,99	18441724,9
0,08	6176916,56	21076257
0,09	6949031,13	23710789,1
0,1	7721145,7	26345321,2

**Gráfica 2. Comparación datos entre Btu/h y vatios con relación al caudal con Etilenglicol al 30%**



En la gráfica anterior se observa que aunque cambie la composición de la sustancia adicionando etilenglicol a la solución los resultados al aumentar el caudal siguen siendo lineales con el paso del tiempo y sus valores más elevados son los de los Watts en comparación con los Btu/h.

**Gráfica 3. Comparación agua pura y Etilenglicol al 30% en Bogotá**

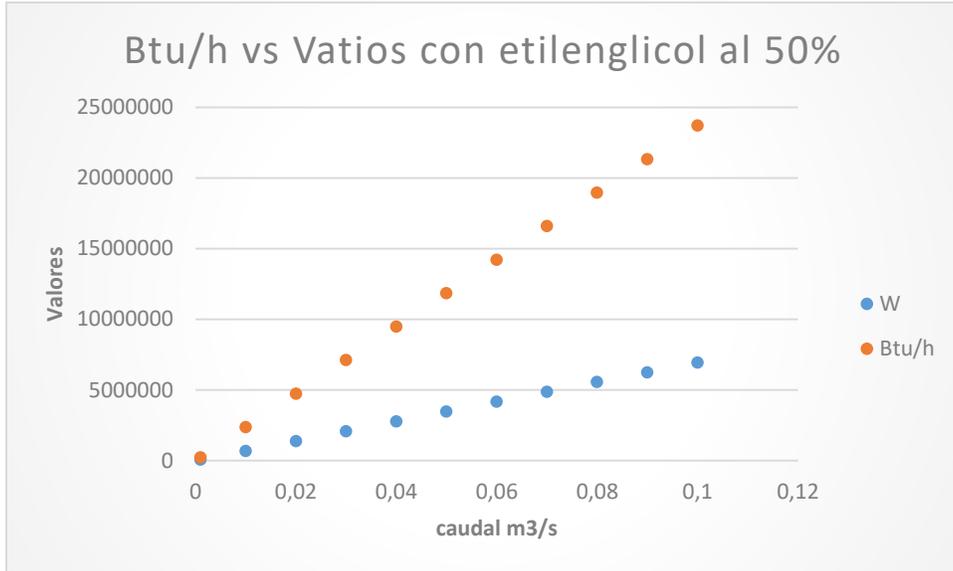


Al comparar la cantidad de vatios producidos al tener agua pura y mezcla al 30% con etilenglicol se observa que al aumentar los caudales el valor de los Vatios de agua pura toman una pequeña diferencia en los últimos valores de la gráfica.

**Tabla 3. Cálculos de Q en unidades de Btu/h, vatios con Etilenglicol al 50%**

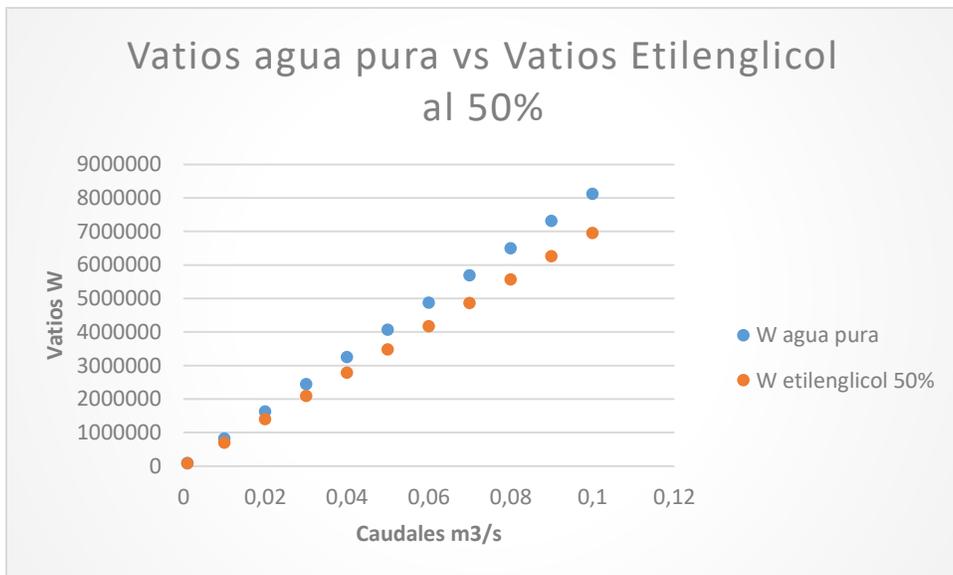
caudal	W	Q Btu/h
0,001	69464,576	237020,08
0,01	694645,76	2370200,8
0,02	1389291,52	4740401,59
0,03	2083937,28	7110602,39
0,04	2778583,04	9480803,18
0,05	3473228,8	11851004
0,06	4167874,56	14221204,8
0,07	4862520,32	16591405,6
0,08	5557166,08	18961606,4
0,09	6251811,84	21331807,2
0,1	6946457,6	23702008

**Gráfica 4. Comparación datos entre Btu/h y vatios con relación al caudal con Etilenglicol al 50%**



Al aumentar el caudal la diferencia entre los btu/h y los vatios se ve aún más considerable y ambas crecen de manera lineal al aumentar el caudal y pasar el tiempo.

**Gráfica 5. Agua pura vs Agua con Etilenglicol al 50% en Bogotá**



La diferencia que se presenta entre los datos de agua pura y etilenglicol al 50% tiene una diferencia más considerable al momento de aumentar el caudal en comparación con los mismos datos pero al 30% de etilenglicol por lo cual se consideraría más aconsejable utilizar la solución al 30%.

## ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS 1 A 5

Como podemos apreciar en las gráficas anteriores en todas se presenta un aumento lineal por lo cual se puede concluir que al aumentar el caudal los vatios, Btu/h y Calorías van en aumento, pero al aumentar el porcentaje de etilenglicol hasta el 50% se disminuyen los valores de vatios, Btu/h y calorías producidos por lo cual depende de la necesidad de vatios necesarios se procederá a seleccionar el porcentaje de etilenglicol óptimo para cumplir con la necesidad presentada por otro lado el caudal es la variable directamente proporcional con el aumento de la potencia en el sistema la cual ira directamente relacionada con los diámetros, presiones y longitudes de los tubos.

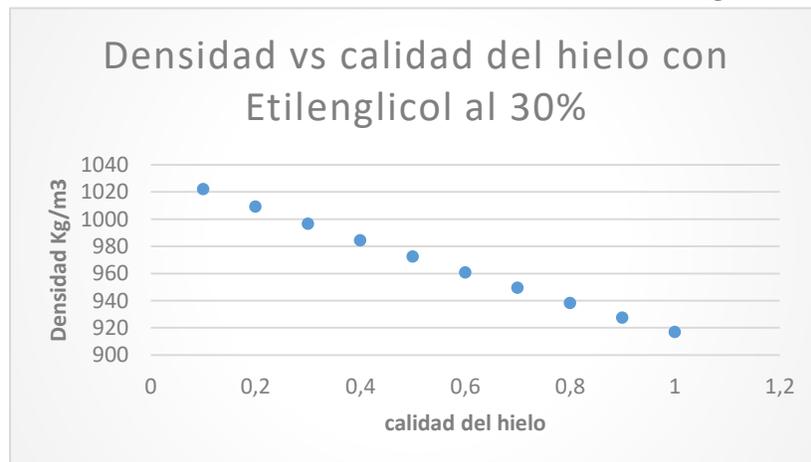
### DATOS OBTENIDOS DE LA SEGUNDA SIMULACIÓN

Para esta simulación realizare unos cambios en los valores de la calidad del hielo los cuales oscilen entre el 50 y 100% y dependiendo de la concentración de etilenglicol la cual ira entre un 30 y 50% respectivamente.

**Tabla 4. Densidad de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 30%**

calidad	densidad solución
0,1	1022
0,2	1009
0,3	996,5
0,4	984,3
0,5	972,3
0,6	960,7
0,7	949,3
0,8	938,2
0,9	927,4
1	916,8

**Gráfica 6. Densidad de la solución al 30% Etilenglicol**

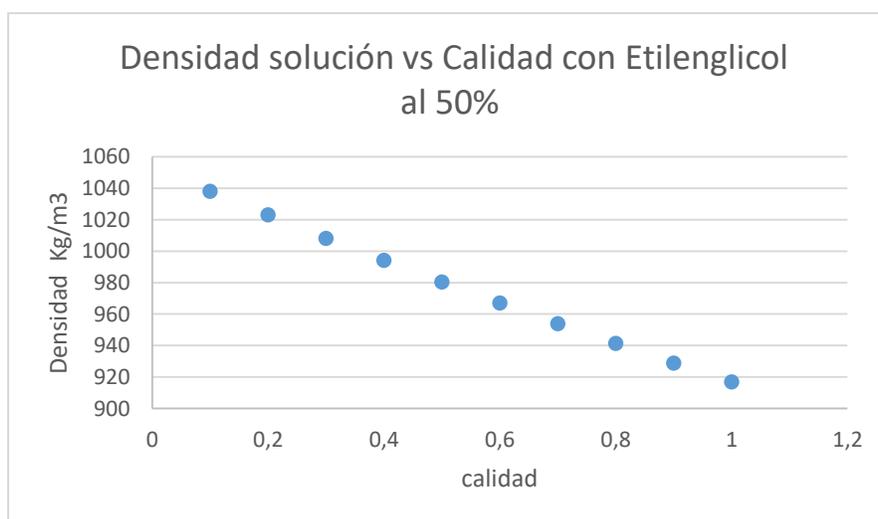


La gráfica 6 representa los valores de densidad los cuales son inversamente proporcionales al aumento de la calidad del hielo y su comportamiento es lineal cuando utilizamos etilenglicol al 30% en la solución donde el máximo valor es de 1022 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 5. Densidad de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 50%**

calidad	densidad solución
0,1	1038
0,2	1023
0,3	1008
0,4	994,1
0,5	980,3
0,6	966,9
0,7	953,9
0,8	941,2
0,9	928,8
1	916,8

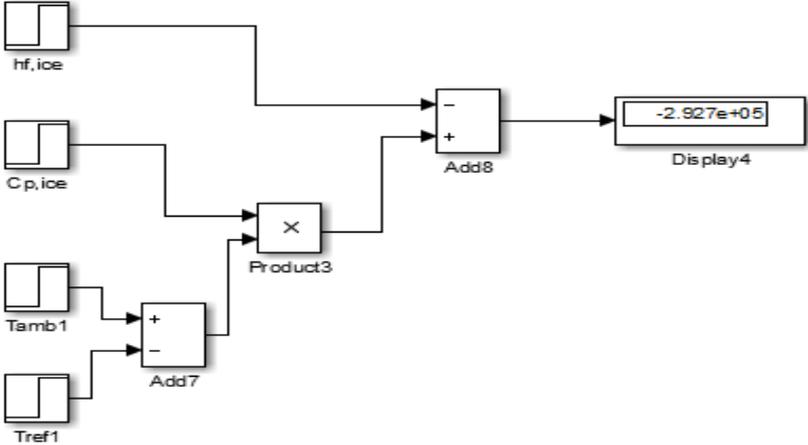
**Gráfica 7. Densidad de la solución al 50% Etilenglicol**



La gráfica representa la variación en la densidad la cual disminuye al aumentar la calidad por lo cual se dice que tiene una relación inversamente proporcional. Como se observa las entalpías son inversamente proporcional a la calidad y al aumentar el porcentaje de etilenglicol al 50% en el compuesto la densidad adquiere un valor mayor en comparación con la del 30%, las dos graficas obtienen valores lineales de disminución sin puntos de estabilización de los valores.

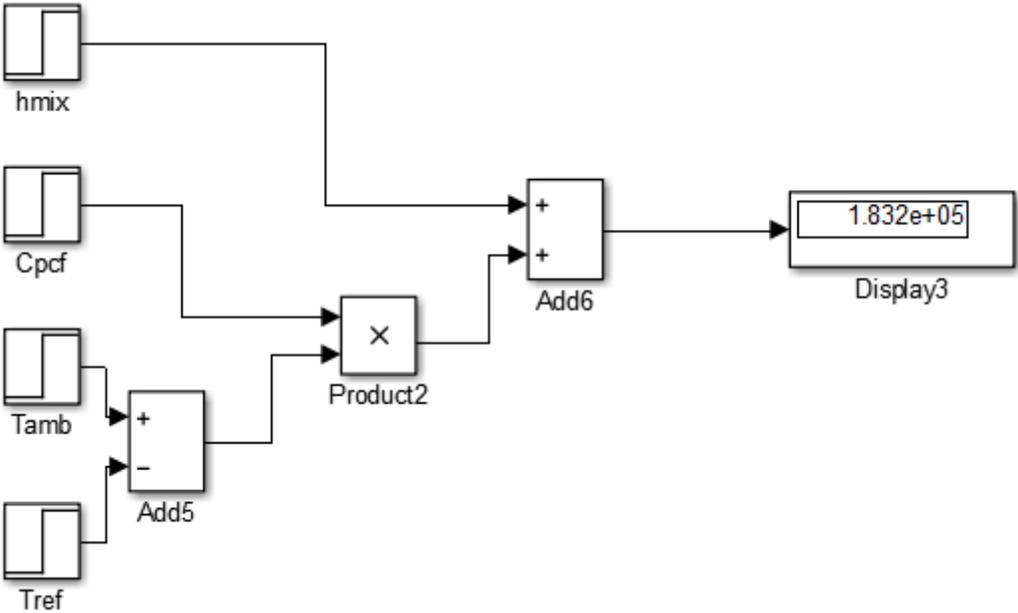
En la tercera simulación calcule la entalpía del hielo tomando como base el Hf, ice como 332400 J/kg como lo indico el artículo.

**Figura9. Resultados simulación Entalpía del hielo en Matlab**

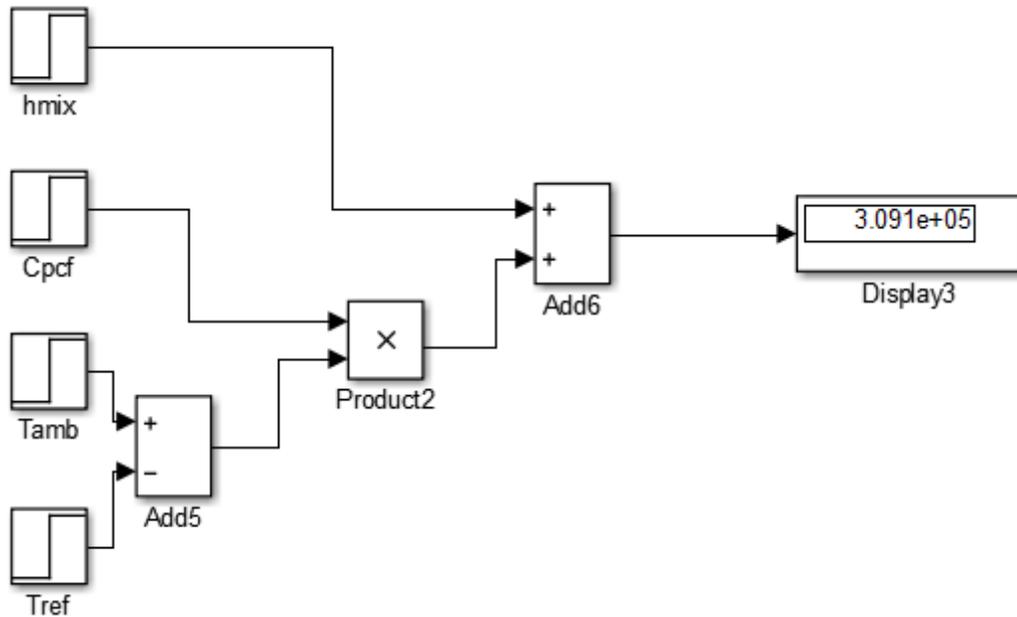


El valor de la entalpía de hielo se calcula directamente pues no hay variables que alteren su resultado.

**Figura10. Resultados simulación Entalpía del Etilenglicol al 30% en Matlab**



**Figura11. Resultados simulación Entalpía del Etilenglicol al 50% en Matlab**

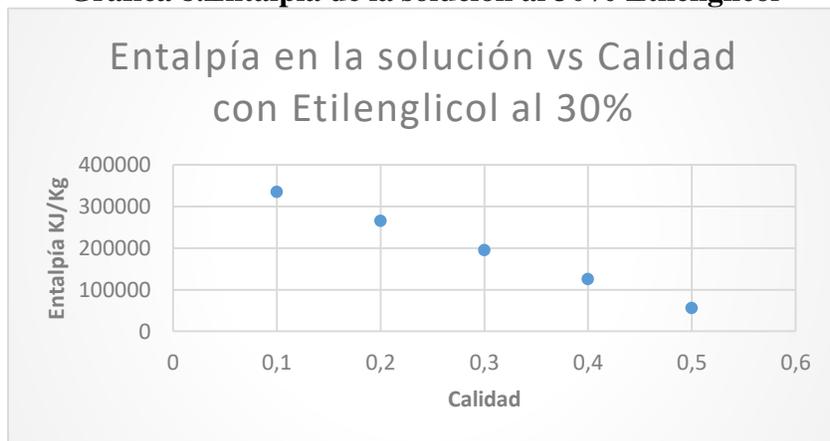


Al calcular la entalpía del etilenglicol al 30 y 50% se observa una gran diferencia en cuanto a los valores debido a la cantidad de etilenglicol que posee la sustancia y al cambio en el valor del calor específico según el porcentaje empleado respectivamente.

**Tabla 6. Entalpía de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 30%**

calidad	entalpía solución
0,1	335300
0,2	265500
0,3	195700
0,4	126000
0,5	56190

**Gráfica 8. Entalpía de la solución al 30% Etilenglicol**

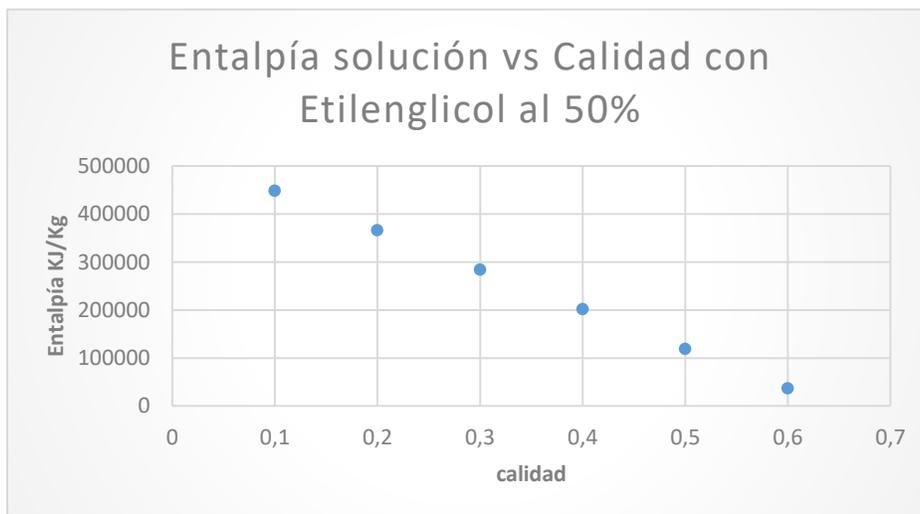


Se observa que al aumentar la calidad el valor de la entalpía desciende linealmente por lo cual son propiedades inversamente proporcionales.

**Tabla 7. Entalpía de la solución con cambios en la calidad con Etilenglicol al 50%**

calidad	entalpía solución
0,1	448600
0,2	366200
0,3	283800
0,4	201500
0,5	119100
0,6	36750

**Gráfica 9. Entalpía de la solución al 50% Etilenglicol**



Se observa que al aumentar la calidad el valor de la Entalpía desciende linealmente por lo cual son propiedades inversamente proporcionales.

### **ANÁLISIS GRAFICA 8 Y 9**

Como se observó la entalpía tanto utilizando etilenglicol al 30 y 50% respectivamente y aumentando caudales presenta una disminución constante por lo cual se determina que la entalpía de la solución es inversamente proporcional al caudal pero cabe diferenciar que los primeros valores de entalpía al 50% son mayores en su totalidad a los del 30%.

## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

- Al aumentar los valores del caudal para calcular la potencia del sistema se observó que la potencia tanto en Btu/h y watts crecen por lo cual al momento de seleccionar el caudal para el funcionamiento del Chiller se recomienda calcular la potencia que se requiere con anterioridad.
- Los valores de potencia más altos se obtuvieron al utilizar el Etilenglicol al 30% debido a que el valor de su calor específico es relativamente mayor que el del 50% y esta propiedad marca la diferencia al calcular este valor por la fórmula propuesta (1).
- La densidad disminuye al aumentar la calidad esto sucede con el Etilenglicol al 30 y 50%, los valores obtenidos de esta variable no presentan gran diferencia en sus valores al aumentar el porcentaje de esta sustancia logrando concluir que la calidad es inversamente proporcional a la densidad.
- La Entalpía de hielo solo cambiará sus valores al variar su delta en la temperatura en ella no incide la cantidad de etilenglicol en el compuesto.
- En el cálculo de la Entalpía del Etilenglicol su valor cambia según el porcentaje utilizado ya sea al 30 o 50% respectivamente donde este a su vez depende del calor específico el cual varía con la temperatura y porcentaje en la mezcla.
- El valor de la Entalpía en la solución es inversamente proporcional a la calidad y sus valores más elevados se dan en la concentración del 50% de Etilenglicol.
- Se concluye que es viable implementar un sistema de acumulación de energía de tipo latente mediante la formación de hielo para disminuir costos energéticos y ayudar al cuidado del medio ambiente.

## RECOMENDACIONES

- Se debe tener especial cuidado a la hora de utilizar las diferentes propiedades como densidad, calor específico entre otras, pues dependiendo de la concentración de etilenglicol en la solución ya sea al 30 o 50% sus valores son diferentes en cada una de las propiedades lo cual puede ocasionar fallas en los resultados.
- Las variables que serán utilizadas en esta simulación no presentan datos atípicos por lo cual se recomienda proceder a hacer un prototipo que permita probar la diferencia entre el comportamiento de simulación vs realidad.
- Si se utiliza un porcentaje mayor al 50% de Etilenglicol la mezcla se vuelve peligrosa debido a que el Etilenglicol es un alcohol y puede provocar una explosión y también dificulta el tránsito del fluido por el sistema.

## REFERENCIAS

- [1] E. Swan *et al.*, “Training & Education,” pp. 1–2, 2019.
- [2] I. Bears and I. B. Acs, “It ’ s Like An Ice-Powered Battery,” pp. 1–17, 2019.
- [3] B. Nordell, *Using ice and snow in thermal energy storage systems*, vol. 8. Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [4] C. Yan, W. Shi, X. Li, and S. Wang, “A seasonal cold storage system based on separate type heat pipe for sustainable building cooling,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 880–889, 2016.
- [5] Y. Ruan, Q. Liu, Z. Li, and J. Wu, “Optimization and analysis of Building Combined Cooling, Heating and Power (BCHP) plants with chilled ice thermal storage system,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 738–754, 2016.
- [6] X. Song, L. Liu, T. Zhu, S. Chen, and Z. Cao, “Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 133, pp. 613–621, 2018.
- [7] M. E. Kuyumcu, H. Tutumlu, and R. Yumrutaş, “Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 121, pp. 349–357, 2016.
- [8] S. Sanaye, A. Fardad, and M. Mostakhdemi, “Thermoeconomic optimization of an ice thermal storage system for gas turbine inlet cooling,” *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 1057–1067, 2011.
- [9] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, *Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications*, vol. 23, no. 3. 2003.
- [10] B. Rismanchi, R. Saidur, H. H. Masjuki, and T. M. I. Mahlia, “Thermodynamic evaluation of utilizing different ice thermal energy storage systems for cooling application in office buildings in Malaysia,” *Energy Build.*, vol. 53, pp. 117–126, 2012.
- [11] M. J. Sebzali and P. A. Rubini, “Analysis of ice cool thermal storage for a clinic building in Kuwait,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 18–19, pp. 3417–3434, 2006.
- [12] S. Liu, H. Li, M. Song, B. Dai, and Z. Sun, “Impacts on the solidification of water on plate surface for cold energy storage using ice slurry,” *Appl. Energy*, no. February, 2017.
- [13] J. Xie and C. Yuan, “Numerical study of thin layer ring on improving the ice formation of building thermal storage system,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 69, no. 1–2, pp. 46–54,

2014.

- [14] F. Sehar, S. Rahman, and M. Pipattanasomporn, “Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings,” *Energy Build.*, vol. 51, pp. 255–262, 2012.
- [15] S. Wang *et al.*, “Discharging performance of a forced-circulation ice thermal storage system for a permanent refuge chamber in an underground mine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 110, pp. 703–709, 2017.
- [16] A. Arteconi, N. J. Hewitt, and F. Polonara, “State of the art of thermal storage for demand-side management,” *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 371–389, 2012.
- [17] M. Hoseini Rahdar, A. Emamzadeh, and A. Ataei, “A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 96, pp. 391–399, 2016.
- [18] A. H. W. Lee and J. W. Jones, “Laboratory performance of an ice-on-coil, thermal-energy storage system for residential and light commercial applications,” *Energy*, vol. 21, no. 2, pp. 115–130, 1996.
- [19] C. T. Wu and Y. H. Tsai, “Design of an ice thermal energy storage system for a building of hospitality operation,” *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 46, pp. 46–54, 2015.
- [20] B. K. Soltan and M. M. Ardehali, “Numerical simulation of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 1, pp. 85–92, 2003.
- [21] J. Xie and C. Yuan, “Parametric study of ice thermal storage system with thin layer ring by Taguchi method,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 98, pp. 246–255, 2016.
- [22] A. Hajiah and M. Krarti, “Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass - Part I: Simulation environment,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 499–508, 2012.
- [23] G. P. Henze, M. Krarti, and M. J. Brandemuehl, “Guidelines for improved performance of ice storage systems,” *Energy Build.*, vol. 35, no. 2, pp. 111–127, 2003.
- [24] Y. H. Yau and S. K. Lee, “Feasibility study of an ice slurry-cooling coil for HVAC and R systems in a tropical building,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 8, pp. 2699–2711, 2010.
- [25] G. L. Augusto, A. B. Culaba, and A. B. Maglaya, *Identification of Design Criteria for District Cooling Distribution Network with Ice Thermal Energy Storage System*, vol. 79. Elsevier B.V., 2015.
- [26] Y. H. Yau and S. K. Lee, “Feasibility study of an ice slurry-cooling coil for HVAC and R systems in a tropical building,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 8, pp. 2699–2711, 2010.

