

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
Sede: “Carlos Rafael Rodríguez”.
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



Trabajo de Diploma

Tema: Metodología para el diseño e implementación de un tanque de almacenamiento de agua helada en un sistema de climatización centralizado en instalaciones turísticas.

Autor: Gian Carlos Wong Tovar.

Tutor: MCs. Yamile Díaz Torres

Ingeniería Mecánica 5to

“Año 61 de la Revolución”

Cienfuegos 2019.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Firma del Tutor

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.

“A lo largo del espacio hay energía, y es una mera cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía.”

Nikola Tesla

Agradecimientos

- *A mis padres por su guía y apoyo incondicional.*
- *A mi novia por estar siempre a mi lado, por darme la fortaleza para seguir luchando y alentarme a cumplir mis sueños.*
- *A mi hermano de corazón, Rubén, por su amistad y apoyo.*
- *A mi suegra por su ayuda y amor.*
- *A mi tutora Yamile Díaz Torres por mostrarme el camino en el desarrollo de este proyecto.*
- *A Pepe Monteagudo por poner siempre a mi disposición su sabiduría.*
- *A todos mis compañeros de aula, profesores, en fin, todas las personas que marcaron mi vida como universitario.*

A todos, muchas gracias.

Dedicatoria

- *A quienes me dieron la vida y enseñaron a conducirme en ella, mis padres.*
- *A mi novia, quien es mi compañera y mi motor.*
- *A mi tutora por estar siempre a mi disposición y brindarme las herramientas para llevar a cabo esta investigación.*
- *A todas aquellas personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.*

Resumen

Mediante el siguiente proyecto se realiza un estudio de factibilidad de la utilización de sistemas de acumulación térmica en sistemas de climatización centralizados en instalaciones turísticas. Se incluye una búsqueda de información bibliográfica para determinar las tecnologías de acumulación energética existentes, así como sus características fundamentales y parámetros de diseño. El estudio de factibilidad se desarrolla para una instalación turística hipotética, diseñando un sistema de acumulación por agua enfriada. Se obtienen las dimensiones aproximadas de los componentes que integran el sistema, la estrategia de funcionamiento más favorable para la instalación (almacenamiento completo) y el ahorro energético y monetario que presenta la implementación de este método.

Palabras claves: acumulación, térmica.

Summary

Through the following project a feasibility study of the use of thermal accumulation systems in centralized air conditioning systems in tourist facilities is carried out. A bibliographic information search is included to determine the existing energy accumulation technologies as well as their fundamental characteristics and design parameters. The feasibility study is developed for a hypothetical tourist facility, designing an accumulation system for chilled water. The approximate dimensions of the components that make up the system are obtained, the most favorable operating strategy for the installation (complete storage) and the energy and monetary savings that the implementation of this method presents.

Keywords: storage, termal.

Índice

Introducción.	10
Capítulo I. Estado del arte de los sistemas de acumulación térmica.	12
1.1-Introduccion a los sistemas de acumulación térmica.	12
1.1.1-Beneficios de los sistemas de acumulación térmica.	13
1.1.2- Características de los sistemas de acumulación utilizados en la hotelería.	13
1.2-Clasificación de los sistemas de acumulación térmica.	14
1.2.1-Sistemas de acumulación de calor sensible.	14
1.2.2- Sistemas de acumulación de calor latente.	17
1.2.3-Acumulación termoquímica.	20
1.3-Tecnologías para el almacenamiento de energía térmica.	21
1.3.1- Dispositivos de almacenamiento.	22
1.3.2- Tipos de tanques de almacenamiento.	23
1.4-Consideraciones para el diseño de un TES.	25
1.4.1-Criterios técnicos.	25
1.4.2-Criterios para su dimensionamiento.	26
1.4.3-Criterios energéticos.	26
1.4.4-Criterio económico.	27
1.4.5- Criterio ambiental.	27
1.5.-Estrategia de operación para los TES.	28
1.5.1 Almacenamiento completo.	28
1.5.2 Almacenamiento parcial.	28
1.6-Ejemplos prácticos de utilización de los TES.	31
1.7- Conclusiones parciales.	33
Capitulo II. Metodología para diseñar y demostrar el aprovechamiento de los TES.	34
2.1-Cálculo de los perfiles de carga.	35
2.1.1- Explicación del funcionamiento del simulador diseñado por la UABC.	35
2.1.2- Cálculo de la carga de enfriamiento (SCRW4).....	36
2.1.3- Obtención de los perfiles de carga.	36
2.2-Metodologia para el diseño de la planta de enfriadoras para un hotel.	38
2.3-Selección del tipo de tecnología a utilizar para la acumulación.	40
2.4- Selección del material aislante para el tanque.	42
2.5- Determinación del volumen de almacenamiento.	43

2.5.1- Relación altura/diámetro con la que se conseguirían minimizar las pérdidas térmicas.....	45
2.6- Requerimientos del servicio eléctrico. Costos del consumo energético producto a las tarifas horarias.	46
2.7- Eficiencia Energética.....	47
2.8-Conclusiones parciales	49
Capítulo III. Estudio de factibilidad de la utilización de técnicas de acumulación de frio en instalaciones turísticas.	50
3.1-Detalles generales del caso de estudio.	50
3.1.1-Resultados de la simulación de cargas térmicas.	50
3.2-Volumen de almacenamiento de agua fría.	52
3.2.1- Calculo de la relación altura/diámetro óptima para minimizar las perdidas térmicas.	52
3.3- Estrategias de operación a emplear ante cada escenario.....	53
3.3.1- Para carga máxima.	53
3.3.2-Carga mínima.	54
3.3.3- Escenario 3	54
3.3.4- Escenario 3.1	55
3.3.5-Escenario 3.2	55
3.3.6-Escenario 4	56
3.3.7-Escenario 4.1	56
3.3.8-Escenario 4.2	57
3.4- Determinación del consumo	58
3.5- Eficiencia.....	60
3.6- Simulación dinámica.....	62
3.7- Análisis de factibilidad económica.	66
3.7.1- Período de Recuperación Simple de Inversión.....	66
3.7.2- Estimación del costo de inversión.....	66
3.7.3-Determinacion del ahorro en dinero diario.	66
3.7.4- Determinación del ahorro anual.	68
3.7.5-Recuperacion de la inversión.	68
3.8-Conclusiones parciales	69
Conclusiones generales.	70
Recomendaciones.	71
Bibliografía.....	72
Anexos	75

Introducción

Los sistemas de climatización centralizados de agua fría son ampliamente utilizados en el sector de los servicios (hoteles, hospitales, etc.) lo que implica un elevado consumo de energía eléctrica y, por tanto, una parte importante en los costos de operación (por ejemplo, más del 60 % del consumo de electricidad en un hotel turístico está asociado a los sistemas de climatización). (Pacheco, 2010)

A nivel mundial existen tecnologías que permiten perfeccionar el funcionamiento de los sistemas de climatización y de agua caliente de servicio, entre las que pueden mencionarse: variadores de velocidad, válvulas inteligentes para la regulación, pizarras de control avanzado, motores y bombas de alta eficiencia, tuberías con mejores propiedades para el transporte, métodos de equilibrio, recuperadores de calor y técnicas de acumulación térmica.

En general, todos estos mecanismos aumentan la eficiencia de las instalaciones, disminuyen el consumo de energía eléctrica y desplazan del horario pico un gran porcentaje de las cargas, con la consecuente disminución de los gastos operacionales.

En particular, los acumuladores de frío son utilizados en las instalaciones de refrigeración o de climatización industrial con el objetivo de disminuir la capacidad frigorífica, con lo cual la inversión inicial disminuye al utilizar compresores más pequeños y, por ende, las tuberías, accesorios, motores eléctricos y demás componentes, también lo son; inclusive al ser los motores más pequeños, disminuye la demanda de carga eléctrica y la necesidad de capacidad en transformadores.

El propósito del almacenamiento de energía térmica en sistemas de acondicionamiento de aire consiste en la acumulación de energía en un horario determinado, para utilizarlo en otro diferente, constituyendo lo que se denomina volante térmico. Estos sistemas utilizan generalmente piscinas o tanques de agua físicamente muy grandes que incrementan los costos iniciales de la instalación pero proporcionan una disminución considerable de los consumos y el costo monetario de la energía en la operación. Aumentan la eficiencia energética y logran reducir cuantitativamente el sobredimensionamiento actual de los sistemas instalados para ofrecer confort habitacional en las instalaciones hoteleras.

Problema científico:

La utilización de sistemas de climatización centralizados en las instalaciones turísticas implica un elevado consumo de energía eléctrica, por lo que no facilitan lograr los indicadores de comportamiento energético establecidos por las cadenas hoteleras.

Hipótesis:

La incorporación de tecnologías de acumulación de frío en el diseño de sistemas de climatización centralizada de instalaciones turísticas permite incrementar la eficiencia, disminuir el consumo de energía eléctrica en comparación a un sistema tradicional y desplazar del horario pico un gran porcentaje de las cargas, con la consecuente disminución de los gastos operacionales.

Objetivo general:

Evaluar la factibilidad técnica y económica de los sistemas de almacenamiento de agua helada como alternativa de mayor eficiencia energética en instalaciones turísticas.

Objetivos específicos:

1. Recopilar y procesar la información sobre las características constructivas y energéticas de los sistemas de acumulación de frío empleados en la climatización.
2. Obtener las cargas térmicas de la instalación turística donde se empleará dicha tecnología.
3. Diseñar un tanque de almacenamiento de agua helada que satisfaga las demandas del sistema.
4. Evaluar la factibilidad técnica y económica de la utilización de técnicas de acumulación de frío en instalaciones turísticas.

Capítulo I. Estado del arte de los sistemas de acumulación térmica.

1.1-Introducción a los sistemas de acumulación térmica.

El desarrollo de las energías renovables implica la generación de energía usando fuentes renovables. Muchas de ellas tienen comportamiento aleatorio, como por ejemplo: la velocidad del viento sobre las turbinas eólicas, la radiación solar en las fuentes fotovoltaicas, la altura de las olas del mar en las fuentes mareomotrices, entre otros. Las fuentes renovables están conectadas a las redes eléctricas o microredes de electricidad. Pero la disponibilidad aleatoria de la energía primaria da como consecuencia períodos con exceso y deficiencia de energía. Esto ha llevado a que se desarrollen diferentes formas para almacenar la energía sobrante a fin de utilizarlo cuando sea necesario y las condiciones de operación del sistema eléctrico lo permitan. (Quadri, 2010)

Uno de los avances más importantes en el desarrollo de la tecnología para el ahorro energético en las edificaciones es el almacenamiento de energía térmica, siendo este uno de los medios más utilizados para corregir el desfase entre las fuentes y la demanda de energía. Además, contribuye significativamente a encontrar una alternativa más eficiente ante las necesidades globales, cumpliendo con los principios ambientales.

Los sistemas de acumulación térmica (TES) por sus siglas en inglés, consisten en un medio de almacenamiento; contenedor y dispositivo de entrada – salida que permite la acumulación de energía en un horario determinado para su posterior uso en otro diferente, contribuyendo a lo que se denomina volante térmico. (Hidalgo, 2011)

Los sistemas de acumulación térmica de agua fría comenzaron a implementarse a nivel mundial desde el siglo XIX, principalmente en la industria química y farmacéutica donde la acumulación de frío era necesaria para mantener productos en buen estado.

En los años 80 debido a los problemas de las compañías eléctricas para satisfacer la creciente demanda energética en los E.U comenzó a implementarse con mayor frecuencia los TES de agua fría en la climatización para disminuir el consumo de electricidad. Esto trajo consigo una cascada de innovaciones y nuevas ideas con el fin de disminuir el costo inicial

de los TES; que era y sigue siendo una de sus principales desventajas, y para tratar de aumentar la eficiencia energética de los mismos. Tendencia que poco a poco fue trasladándose a Europa y de ahí a todo el mundo. (Ma F. B., 2010)

En la actualidad gracias al gran número de beneficios de los TES estos se utilizan en todo el planeta ya sea en edificios residenciales, hospitales, escuelas, hoteles e industrialmente.

1.1.1-Beneficios de los sistemas de acumulación térmica.

Los TES traen como beneficio el aprovechamiento de las tarifas eléctricas más bajas estimulando el uso eficiente de la energía así como el ahorro de la misma y permiten una mayor fiabilidad en la generación debido a que la energía proviene de dos fuentes; las plantas enfriadoras y los tanques de acumulación. Además cuando ocurren cortes de suministro de energía eléctrica se cuenta con determinado tiempo de confort gracias a la carga térmica almacenada, así como paradas en la instalación para su mantenimiento. También estos sistemas favorecen a la fiabilidad y calidad del suministro, la estabilidad de la red de transmisión y una reserva de energía de rápida disponibilidad. (Schutz, 2015)

Estos sistemas a partir de las crecientes preocupaciones ambientales pueden jugar un papel vital en la reducción de la contaminación ambiental, pues al reducir el consumo de energía favorece a la conservación de combustibles fósiles y a una menor emisión de CO₂, SO₂, etc.

1.1.2- Características de los sistemas de acumulación utilizados en la hotelería.

El almacenamiento de frío constituye una alternativa para reducir los costos energéticos y de inversión en aquellos sistemas de refrigeración y climatización con una demanda variable en el tiempo. Este mecanismo, permite reducir la capacidad instalada, disminuir los costos fijos, así como reducir la demanda máxima contratada y el consumo de energía en los horarios de mayor costo de la electricidad (costos del kWh), con la correspondiente disminución de la facturación eléctrica. Además no considera sólo el ahorro interno del hotel sino también el que se consigue en la generación de energía eléctrica por disminución de los mantenimientos, gastos de combustible, etc. El almacenamiento de energía térmica es considerado uno de los avances más importantes en la tecnología del ahorro de energía en

edificaciones. Esta técnica parece ser la única solución para corregir el desfase entre la fuente y la demanda de energía. Además, puede contribuir significativamente a encontrar una alternativa más eficiente ante las necesidades globales, cumpliendo con los principios ambientales (Pérez, 2012).

1.2-Clasificación de los sistemas de acumulación térmica.

Los sistemas de almacenamiento térmico se pueden dividir en función del mecanismo de almacenamiento de calor. Según esta división existen tres tipos de TES; sensibles (agua, roca, etc.), latentes (agua/hielo e hidrato de sal), y termoquímicos (sustancias inorgánicas) (Dincer, 2001)

En cualquier caso, los requerimientos de optimización que demandaremos de un sistema de acumulación serán los siguientes:

- Gran capacidad térmica de almacenamiento por unidad de masa o de volumen.
- Reversibilidad para un gran número de ciclos.
- Uniformidad de temperaturas.
- Posibilidad de almacenaje en recipientes.
- Empleo de productos no contaminantes y peligrosos.
- Larga durabilidad.
- Bajo costo tanto del material a emplear, como de la instalación necesaria y reducido mantenimiento de la misma.

1.2.1-Sistemas de acumulación de calor sensible.

En estos sistemas la propiedad principal es cambiar la temperatura que presenta todo el cuerpo. El agua es el mejor medio para el almacenamiento de calor sensible, ya que tiene alta capacidad térmica (relación entre el cambio de energía térmica de un medio y su temperatura) y es de fácil disponibilidad aparte de que ni es tóxica ni inflamable. Subir la temperatura de un medio de almacenamiento provoca que se reduzca el calor sensible en el cuerpo y a la inversa se recupera el calor almacenado bajando la temperatura en el almacén. Es propio de este tipo de sistemas que la fase del medio de almacenamiento (sólido, líquido o gaseoso) no se cambie durante el funcionamiento habitual del sistema. (S.M.Homain, 1998)

El almacenamiento de calor sensible se realiza elevando la temperatura del medio de almacenamiento. Por lo que se requiere que el mismo cumpla con diferentes características como son:

- Alta capacidad térmica específica
- Estabilidad a largo plazo en ciclos térmicos
- Compatibilidad con su contención
- Bajo costo

Dentro del procedimiento del calor sensible pueden utilizarse materiales que formen parte de la propia estructura de la edificación, u otras que tengan como única finalidad el almacenamiento térmico. A continuación, en la tabla 1.1 se exponen diferentes materiales con sus propiedades físico-térmicas más características.

Tabla1.1 – Materiales con sus propiedades físico térmicas. (Sáiz, 1991)

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m³)	CALOR ESPECÍFICO (kJ/kg K)
Adobe aligerado	1.000	0,84
Aire	1,29	1,00
Agua	1.000	4,20
Aluminio	2.700	0,88
Cantos rodados	2.200 - 2.500	0,70 - 0,92
Carbonato sódico	2.510	1,09
Cloruro cálcico	2.510	0,67
Cloruro potásico	1.980	0,67
Enfoscado de cemento	1.570	1,00
Fundición	7.754	0,46
Granito	2.600	0,90
Hormigón	2.100	0,84
Hormigón aligerado (bloques)	600	1,00
Ladrillo ligero	1.300	0,84
Ladrillo macizo	1.900	0,84
Madera	600	1,20
Mármol	2.500	0,80
Óxido de aluminio	3.900	0,84
Óxido de magnesio	3.600	0,96
Roca volcánica	1.200	1,50
Sulfato sódico	2.700	0,92
Tablero de fibras	300	1,00
Tejas	1.900	0,78
Tierra seca	1.700	0,84
Yeso	1.300	1,00

Tabla 1.2. Capacidad térmica de medios de almacenamiento (Harm, 2015)

Medio	Tmin.	Tmax.	Densidad	k	Cp	Coste medio
	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(W/mK)	(kJ/kg K)	(US\$/kg)
Medios líquidos						
Agua	0	100	1 000	0,60	4,18	<0,01
Aceite mineral	200	300	770	0,12	2,60	4,2
Aceite de silicona	300	400	900	0,10	2,10	80,0
Sales Nitratos	265	565	1 870	0,52	1,60	3,7
Sodio líquido	270	530	850	71,00	1,30	21,0
Sales Carbonatos	450	850	2 100	2,00	1,80	11,0
Medios sólidos						
Hormigón armado	200	400	2 200	1,50	0,85	1,0
Acero colado	200	700	7 800	40,00	0,60	60,0
Ladrillos refractarios Silica	200	700	1 820	1,50	1,00	7,0
Ladrillos refractarios Magnesia	200	1 200	3 000	5,00	1,15	6,0

1.2.1.1- Almacenamiento en forma sólida.

En todos los sistemas de almacenamiento estudiados, se busca conseguir la mayor conductividad térmica posible al menor precio, por tanto, son muy utilizados materiales como hormigón y cerámicas moldeables. Ambos presentan buenas características para ser usados como materiales de almacenamiento de energía térmica. La siguiente tabla resume las principales características de los materiales sólidos más utilizados con este propósito (tabla 1.3), destacando el papel que juega el hormigón, ya que ofrece propiedades adecuadas de temperatura a un coste realmente bajo en comparación con otras opciones, tal y como podemos observar en la columna de costo por kilogramo. (Pérez, 2012)

Tabla 1.3 - Principales materiales empleados como almacenadores en forma sólida. (Tarrillo, 2012)

Material	Contenido energético	
	Por peso (mJ/kg)	Por volumen(mJ/m ³)
Poliuretano expandido	180	2.500
Aluminio	170	459.000
PVC	90	11.000
Cobre	78	698.000
Vinilicio	45	6.000

Hierro y acero	40	300.000
Fibra de vidrio	38	2.000
Vidrio	26	67.000
Block de concreto	22	35.000
Ladrillo cerámico hueco	7.5	1.000
Yeso	2.4	1.700
Ladrillo común	1.8	3.000
Concreto armado	1.8	4.000
Concreto	1.8	2.600
Adobe	0.2	320

Sin embargo, esta tipología de almacenamiento tiene un claro inconveniente que debe mejorarse para aumentar su uso a nivel comercial, se debe aumentar la eficiencia en el intercambio térmico. Casi todos los estudios que utilizan materiales sólidos centran su investigación en la disposición concreta de material de almacenamiento y HTF para maximizar la transferencia de energía térmica, comparando en un mismo proyecto el comportamiento de distintos tipos de materiales y disposiciones para obtener, en forma de simulaciones y posteriormente en forma experimental la mejor disposición para cada caso concreto y rango de temperaturas. Otros factores también muy tenidos en cuenta son la compatibilidad entre el HTF, el fluido de almacenamiento y el recinto donde circula o se almacena. (Liu, 2017)

1.2.1.2- Almacenamiento en forma líquida.

Con respecto al almacenamiento en forma líquida, gran cantidad de fluidos han sido probados y utilizados para transportar el calor, como por ejemplo agua, aire, aceites térmicos, sodio o sales fundidas, siendo estas últimas las más utilizadas.

1.2.2- Sistemas de acumulación de calor latente.

Esta forma de acumulación de calor; se basa en el proceso donde la energía térmica se carga y descarga en el proceso físico de cambio de fase provocando una alta densidad de almacenamiento con temperaturas constantes; el cambio de fase de un material de líquido a gaseoso requiere una cantidad de energía específica muy superior a la necesaria para

subir la temperatura del líquido, este calor necesario para la evaporación se llama calor latente ya que no está asociado con un cambio de temperatura. (Figura1) (A.Wagas, 2011)

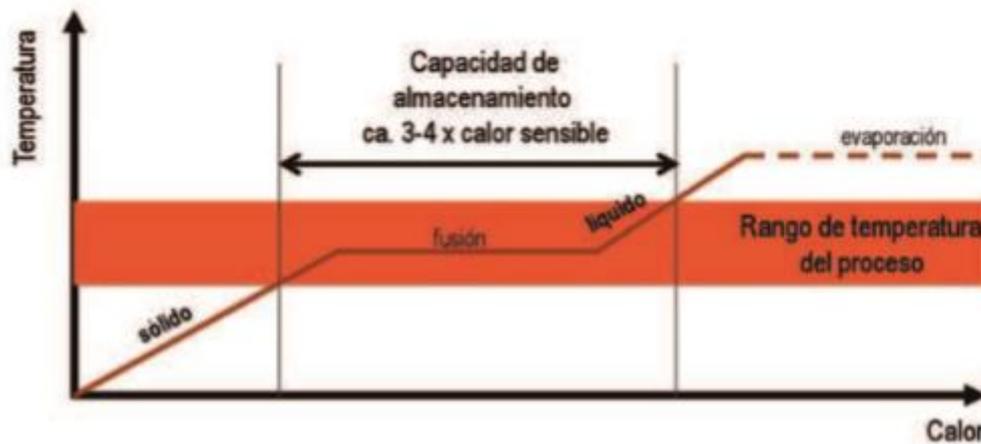


Figura 1.1- Capacidad de almacenamiento de calor latente (Vicente, 2014)

Al invertir el proceso y condensar el vapor, el calor latente de la evaporación se libera en forma de calor de condensación. Al extender la curva hacia temperaturas inferiores se llega al punto de cambio de fase líquido-sólido donde también existe un efecto calorífico. (Ochoa, 2017)

Para la acumulación de calor latente se pueden aprovechar cualquiera de estos dos puntos de cambio de fase pero el sistema debe cumplir con que:

- El cambio de fase tiene lugar en una temperatura determinada la cual se mantiene constante durante el mismo.
- En el punto de ebullición líquido-gaseoso ocurre una expansión del volumen.
- Con el cambio líquido-sólido cambia también el mecanismo de transporte de calor de conexión a conducción.

El almacenamiento calor latente es una técnica particularmente atractiva la cual proporciona una alta densidad de almacenamiento de energía y tiene la capacidad de almacenar calor como calor de fusión latente a una temperatura constante correspondiente a la temperatura de transición de fase de los materiales de cambio de fase (PCM).

(V.V.Tyaqi, 2007)

1.2.2.1- Almacenamiento de calor latente en fase sólida-sólida (SSPCM).

Sistemas de almacenamiento basado en la propiedad de algunos materiales, fundamentalmente de materiales metálicos o derivados del petróleo, de cambiar su

estructura interna, absorbiendo energía sin abandonar el estado sólido. Éste tipo de almacenamiento ofrece multitud de ventajas, sin embargo, para los rangos de temperatura usados en centrales CSP queda muy reducido el número de materiales a utilizar, fundamentalmente metálicos.

1.2.2.2- Almacenamiento de calor latente en fase sólida-líquida.

Es la forma de almacenamiento en calor latente más desarrollada y aplicada en casos reales. Aunque hay que lidiar con un aumento del volumen de alrededor del 10%. Ofrece una mayor capacidad para transmitir energía térmica que en el caso sólido-sólido, aunque no lo suficiente como para que éste deje de ser un factor fundamental a tener en cuenta. Lleva asociado el diseño de intercambiadores de calor adecuados o métodos que permitan aumentar dicha conductividad. (Massimo Fiorentini, 2015)

1.2.2.3- Almacenamiento de calor latente en fase líquida-gas.

De gran complejidad debido al gran aumento de volumen que tiene lugar al cambiar de la fase líquida a la gaseosa. Aun teniendo una gran capacidad de almacenamiento de calor latente, éste inconveniente hace que su desarrollo sea muy limitado

1.2.2.3-Materiales de cambio de fase (PCM)

Los materiales usados en estos sistemas se caracterizan por tener un alto calor de fusión y un punto de transición de fase cercano a la temperatura de operación (tabla 1.3) , siendo los más utilizados las ceras parafinas, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos, etc. Los cuales tienen la capacidad de almacenar calor como calor de fusión latente a una temperatura constante correspondiente a la temperatura de transición de fase de los PCM. (E.Onoó, 2012)

Cuando se va seleccionar el medio adecuado para el almacenamiento de calor latente hay que tener en cuenta diferentes aspectos como son la toxicidad, la inflamabilidad, el precio y la corrosividad. Pero los aspectos más importantes son; la temperatura de fusión del material y su adecuación con la temperatura del proceso, y su calor de fusión que determina la capacidad de almacenamiento. (Anexo 1)

Tabla 1.4- Materiales de cambio de fase, propiedades. (Asensi, Carlos, & Joaquim, 2012)

FUSIÓN		EVAPORA- CIÓN	CAPACIDAD TÉRMICA CP [KJ/KG K]	CALOR DE FUSIÓN [KJ/KG]	CALOR DE EVAPORACIÓN [KJ/KG]
Agua	0	100	4,18	333,2	2.270
KNO ₃	337		0,95	95,1	
NaNO ₃	307		1,10	182,4	
Parafina	60		2,1	200 ... 240	
C ₂ H ₃ NaO ₂	58		1,98	260	

1.2.3-Acumulación termoquímica.

Estos se basan en reacciones físico-químicas o químicas reversibles que tengan un efecto calorífico pronunciado, como es la separación de enlaces, que está asociada con la absorción de energía (carga del sistema), y la recuperación de esta energía mediante la puesta en contacto y la reacción de los reactantes previamente separados asociada con la liberación de energía (descarga del sistema).

Mediante este principio de almacenamiento de energía térmica no se generan pérdidas térmicas en el estado de acumulación por separación de los reactantes.

A continuación la tabla 1.5 muestra algunos materiales que podrían ser apropiados para el almacenamiento termoquímico.

Tabla 1.5- Algunos materiales que podrían servir para el almacenamiento termoquímico. (Rodado, 2013)

Compuesto (-)	T (°C)	Reacción (-)	ΔH (kJ/mol)
Óxido de manganeso	530	$MnO_2 + \Delta H \leftrightarrow 0,5Mn_2O_3 + 0,25O_2$	42
Hidróxido de calcio	505	$Ca(OH)_2 + \Delta H \leftrightarrow CaO + H_2O$	112
Carbonato de calcio	896	$CaCO_3 + \Delta H \leftrightarrow CaO + CO_2$	167
Hidruro de magnesio	250-500	$MgH_2 + \Delta H \leftrightarrow Mg + H_2$	75
Amoníaco	400-500	$NH_3 + \Delta H \leftrightarrow 1/2N_2 + 3/2H_2$	67
Metano/Agua	500-1000	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	n.a.
Óxido de magnesio	250-400	$MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$	81
Carbonato de hierro	180	$FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$	
Hidruros metálicos	200-300	$Metal xH_2 \leftrightarrow Metal yH_2 + (x - y)H_2$	
Metanización-desmetanización	200-250	$CH_3OH \leftrightarrow CO + 2H_2$	n.a.

El calor de reacción dota a este sistema de una gran densidad energética. Asimismo, debido a que los productos de la reacción de disociación podrían almacenarse a temperatura ambiente.

Desafortunadamente la estabilidad cíclica es una de las grandes limitaciones de este sistema; a medida que pasa el tiempo las propiedades del medio de almacenamiento pueden degradarse, lo cual puede dar lugar a una disminución tanto de la potencia térmica de transferencia de calor como de la capacidad de almacenamiento. (Sahir, 2013)

Otras importantes limitaciones son:

- La reversibilidad de las reacciones químicas
- El costo del sistema
- La baja conductividad térmica que por lo general presentan los medios de almacenamiento adecuado para esta tecnología.

1.3-Tecnologías para el almacenamiento de energía térmica.

Existe una clasificación de los sistemas de almacenamiento atendiendo a la manera en la que se transfiere el calor al medio de almacenamiento. Según este criterio, puede diferenciarse entre sistemas activos y sistemas pasivos (Figura 1.2).

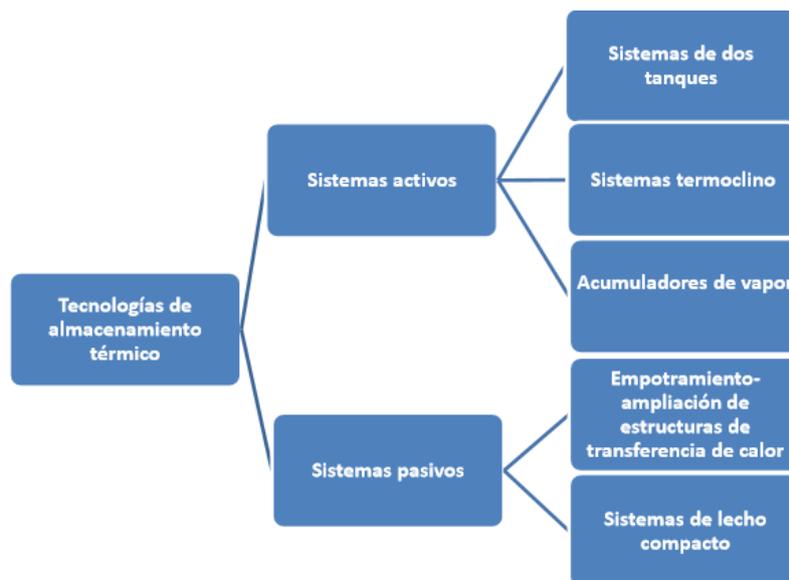


Figura 1.2- Tipos de tecnología de almacenamiento.

Un sistema activo se caracteriza principalmente por un intercambio de calor con el material de almacenamiento por convección forzada. El medio de almacenamiento circula por el intercambiador de calor (también puede ser un receptor solar o un acumulador/regenerador de vapor). Estos sistemas utilizan uno o dos tanques. A su vez, los sistemas activos se subdividen en sistemas directos e indirectos. En sistemas directos, el fluido de transferencia hace además las veces de medio de almacenamiento, mientras que en un sistema indirecto se transfiere el calor desde el fluido de transferencia hacia un medio de almacenamiento distinto, a través de un intercambiador de calor. (Schilpf, 2014)

Los sistemas pasivos son generalmente medios duales: el fluido de transferencia pasa a través del sistema de almacenamiento solo para la carga y descarga de un material sólido. Estos sistemas son también denominados regeneradores. La disposición en la que el fluido de transferencia pasa por el medio de almacenamiento es un parámetro especialmente crítico en la transferencia de calor en estos sistemas, puesto que el medio de almacenamiento suele encontrarse mayormente en estado sólido. Los sistemas pasivos podrían incluir materiales sólidos como rocas, arena u hormigón, o incluso materiales de cambio de fase.

Si el medio de almacenamiento es un material de cambio de fase sólido-líquido, se han de tener en cuenta consideraciones adicionales en el diseño que incluyan la separación del medio de almacenamiento líquido y del fluido de transferencia (almacenamiento en tanques, intercambiadores de calor, microencapsulación y macroencapsulación).

1.3.1- Dispositivos de almacenamiento.

En los tanques de almacenamiento de agua helada existen técnicas de separación del agua fría de la caliente. Se le llama agua caliente al volumen de agua que es introducido en la parte superior del tanque y que llega a una temperatura más alta que la almacenada, producto del calor absorbido tras pasar por las zonas térmicas. Estos volúmenes de agua con temperaturas desiguales, por diferencia de densidades la más fría se deposita en el fondo y la caliente arriba. Este efecto divisorio del volumen de agua es deseado porque mientras menos se mezclen el agua caliente del retorno con la fría almacenada, la temperatura promedio del tanque es menor, por tanto, la energía que puede absorber durante el período de descarga es mayor. (Miranda, 2019) Existen varias técnicas para separar las dos zonas, las cuales son: mediante un diafragma flexible, tanque con múltiples compartimentos, tanques con laberintos y la estratificación térmica, esta última se ha

convertido en el método dominante debido a su simplicidad, fiabilidad, eficiencia y bajos costos (ASHRAE, 1999). A los sistemas estratificados se les sustrae y se les suministran agua a bajas velocidades, con el fin de crear un flujo horizontal para que la fuerza de sustentabilidad domine el efecto de inercia. En otras palabras se crea una zona llamada termoclina. La termoclina impide que se cree una mezcla del agua que esta tanto por debajo de ella como por encima. Durante el período de carga la altura de la termoclina sube y en la descarga baja, (ASHRAE, 1999).

1.3.2- Tipos de tanques de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento pueden ser cilíndricos o esféricos, estos últimos se utilizan para almacenar productos con altas presiones de vapor, como por ejemplo butanos, propanos, amoniaco, hidrogeno y otros.

Además pueden emplearse tanques cilíndricos horizontales o verticales. Por motivos de esfuerzos de corte y de flexión, los tanques horizontales suelen emplearse solo para almacenar bajos volúmenes de líquidos. Por otro lado, los tanques cilíndricos verticales si son adecuados para almacenar grandes volúmenes y además a bajo coste. (Varios, 2015)

Estudios recientes realizados en Inglaterra y disponibles en establecen los cuidados básicos en el almacenamiento de agua (caliente y fría). Tales criterios, que tienen en vista evitar la proliferación de bacterias como la Legionella, así son enumerados:

- El volumen almacenado de agua caliente y fría debe reducirse a lo mínimo necesario. Los tanques deben cerrarse para prevenir la entrada de material orgánico.
- Aislamiento de los componentes para que las temperaturas permanezcan fuera del rango crítico de crecimiento de las bacterias, entre 20 y 50oC.
- Para la Legionella, el rango excelente de crecimiento está entre 35 y 46oC, siendo destruida instantáneamente en temperaturas mayores que 70oC. Para valores mayores que 55oC, esa bacteria sobrevive como máximo entre 5 y 6 horas, en un estudio nacional realizado a los bomberos hidráulicos de Nueva Zelanda.-
- Empleo de materiales metálicos e inorgánicos en las conexiones y accesorios de las tuberías
- Limpieza regular de las partes vulnerables del sistema

Como se muestra en la Figura 1.3, los tanques térmicos están constituidos por un cuerpo interno aislado térmicamente, recubierto por una protección externa contra la intemperie.

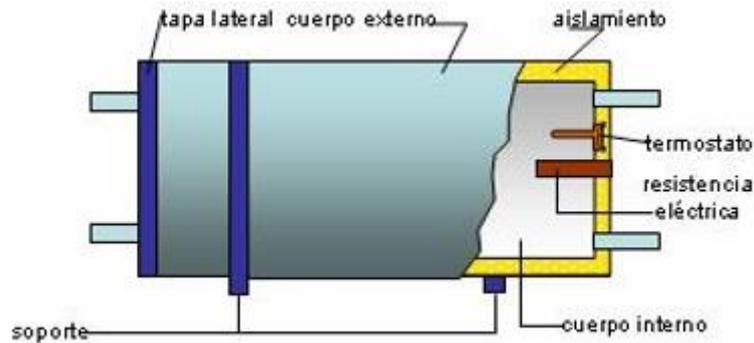


Figura 1.3- Tanque térmico y sus componentes principales

El cuerpo interno por estar en contacto directo con el agua, generalmente es fabricado con materiales resistentes a la corrosión, como cobre, acero inoxidable y acero con tratamiento vitrificado o esmaltado. También están disponibles en el mercado brasileño tanques hechos en fibra de vidrio y polipropileno. Además de ello, su cuerpo interno debe soportar las variaciones de presión que ocurran debido a las fluctuaciones en la red de abastecimiento. Cuanto mayor sea la presión de trabajo prevista, mayor será el espesor de la pared del cuerpo interno.

La función del aislamiento térmico es minimizar la transferencia de calor del agua al ambiente. De esta forma, de manera semejante a la que ocurre en las placas colectoras, el aislamiento debe ofrecer alta resistencia al paso del calor. Generalmente los materiales más usados son el poliuretano expandido, la lana de vidrio y la lana de roca. En este punto, se debe destacar que, cuanto menor es el volumen de agua almacenada en el tanque menor será su constante de tiempo térmica. Tal fenómeno crea el siguiente criterio técnico:

Tanques térmicos con volúmenes diferentes e aislados con el mismo aislante deberán usar **MAYORES ESPESORES PARA LOS TANQUES DE MENOR VOLUMEN**. Una relación mayor superficie-volumen (S/V) implica mayores pérdidas térmicas a través de las paredes del tanque térmico, por lo tanto, debe aislarse mejor. (Ruiz, 2016)

1.4-Consideraciones para el diseño de un TES.

Los sistemas de acumulación térmica pueden adoptar muchas formas de acuerdo a su aplicación y sea para; aire acondicionado fuera de horas pico, enfriamiento industrial de procesos, calefacción y muchos más. Para la selección de un almacenamiento primero se requiere un estudio de factibilidad detallado. Los datos necesarios para este estudio incluyen un perfil de carga de 24 horas para el día de diseño y la descripción de un sistema de línea de base sin almacenamiento, incluida la capacidad del enfriador, las condiciones de operación y la eficiencia. (H.Lin, 2014)

La descripción de un sistema TES a menudo estipula lo siguiente:

- La base de tamaño; son los cálculos que muestran la capacidad de almacenamiento de acuerdo a los requisitos necesarios.
- El perfil operativo de diseño; muestra la carga, la salida de la enfriadora y la cantidad de calor extraída o agregada del almacenamiento.
- La eficiencia del enfriador bajo cada condición de operación
- Descripción de la estrategia de control del sistema.
- Un análisis de costos operativos; evaluación del ahorro de la demanda.

Existen muchos criterios para poder evaluar los sistemas TES; técnicas, dimensionamiento, economía, ahorro de energía y medio ambiente.

1.4.1-Criterios técnicos.

En los sistemas de almacenamiento es muy complicado establecer los criterios técnicos, pues cada sistema tiene sus especificidades y dependen en gran medida de la economía de los sistemas resultantes. Para diseñar un sistema TES primero se debe obtener información técnica ya sea; tipos de almacenamiento disponibles, cantidad requerida, el efecto del almacenamiento en el rendimiento del sistema, la confiabilidad, el costo y los diseños disponibles. Se debe tener en cuenta la dificultad de emplear estos sistemas cuando existen restricciones de espacio ya que los tanques de almacenamiento generalmente tienen gran tamaño y también se debe tener en cuenta el costo de los mismos que puede ser muy elevado.

En un TES utilizado para el enfriamiento el agua fría se almacena en una masa de almacenamiento térmico, este puede incorporarse a un sistema de aire acondicionado o de refrigeración, en la mayoría de los cuales existen dos componentes principales:

- Un enfriador; para enfriar el agua.
- Un sistema de distribución para transportar el líquido frío desde la enfriadora hasta donde se enfría el aire.

1.4.2-Criterios para su dimensionamiento.

Para el diseño de un TES es muy importante tener en cuenta el dimensionamiento del mismo; debido a que un tamaño insuficiente del tanque de almacenamiento puede traer consigo bajos niveles de confort ya que la energía almacenada no sería suficiente para satisfacer toda la carga térmica del edificio donde se instale el sistema de refrigeración. Mientras que el tamaño excesivo o sobredimensionamiento del tanque traería consigo costos iniciales más altos de los necesarios, además de desperdiciar electricidad (aumentando el costo de funcionamiento) al almacenar más energía de la necesaria. La instalación y el control adecuado también afectan el tamaño de un TES.

Un sistema de almacenamiento diseñado teniendo en cuenta las características del local (edificio, casa, salón, etc.) y siendo adecuadamente controlado utiliza menos energía que los equipos de calefacción y refrigeración convencionales.

1.4.3-Criterios energéticos.

Los sistemas de almacenamiento de energía hoy en día son muy utilizados tanto en la industria como en edificios comerciales por el ahorro de energía que estos representan. Los TES parecen ser la mejor solución para corregir los desajustes entre los tiempos de oferta y demanda de energía, cambiando el tiempo en que se usa la electricidad reduciendo el combustible o la energía requerida.

Para cuantificar el impacto energético del TES y para calcular el ahorro de energía se puede utilizar el método de energía incremental; mediante el cual se toman decisiones sobre que recurso usar de acuerdo a los costos. (M.A.Ezan, 2010)

El ahorro energético de los TES puede lograrse de varias maneras:

- El consumo de energía puede reducirse almacenando los residuos o el excedente de energía térmica disponible en ciertos momentos para usar en otros.

- La demanda de energía eléctrica puede reducirse almacenando energía térmica producida eléctricamente durante los periodos de menor actividad para satisfacer las cargas térmicas que se producen durante los periodos de alta demanda. Ejemplo; una enfriadora eléctrica se puede utilizar para cargar un tanque de agua fría durante la noche cuando es menor la tarifa eléctrica y luego utilizarse esta carga térmica durante el día.
- El equipo puede ser operado cuando las cargas térmicas son bajas para cargar los sistemas de acumulación térmica.
- Cuando la carga térmica exceda la capacidad del equipo energético instalado se puede retirar la energía faltante del almacenamiento para igualar el perfil de carga requerido.

1.4.4-Criterio económico.

Los sistemas TES son económicamente justificables debido a que los costos de adquisición son menores que los costos de equipos de generación primaria que brindan el mismo servicio teniendo en cuenta las cargas y los periodos. Un sistema de acumulación térmica se instala con el fin de reducir los costos iniciales y de operación de otros componentes de una planta de refrigeración, estos costos más bajos se obtienen cuando ocurren grandes duraciones entre periodos de demanda energética.

También es necesario determinar los costos iniciales para completar el análisis económico de un sistema TES. Los costos del equipo se deben obtener de los fabricantes y se debe estimar el costo de instalación. Los costos de capital neto a invertir deben analizarse utilizando el método del costo del ciclo de vida, para así determinar qué sistema satisface económicamente mejor al proyecto. (I.Dincer, 2001)

1.4.5- Criterio ambiental.

La implementación de un sistema TES contribuye significativamente a satisfacer las necesidades de la sociedad de un uso más eficiente de la energía para la calefacción, la refrigeración, la energía espacial y las aplicaciones de servicio público. Al reducir la emisión de contaminantes (CO₂, SO₂ y otros) reducen el impacto destructivo de los mismos en la capa de ozono.

Los refrigerantes utilizados en los enfriadores de equipos de calefacción y refrigeración emiten gases producto de la combustión. Estos sistemas reducen esa expulsión de gases ya que requieren menos capacidad de enfriamiento que los sistemas convencionales por lo

que generalmente sus enfriadores son más pequeños o utilizan menos refrigerantes. Además utilizando los sistemas TES se puede configurar la pérdida de capacidad de enfriamiento en los enfriadores utilizando refrigerantes más benignos; situación la cual agradecen los operadores pues pueden estar más dispuestos a cambiar los mismos.

1.5.-Estrategia de operación para los TES.

En el proceso de carga y descarga en el almacenamiento de frío existen varias estrategias para satisfacer la demanda de frío durante las horas pico. Estas estrategias son

1.5.1 Almacenamiento completo.

Esta estrategia también es conocida como traslado de carga, ya que consiste en trasladar toda la carga de enfriamiento a vencer en el pico para las horas no pico. El sistema generalmente está diseñado para trabajar a toda capacidad durante las horas no pico y así cargar el tanque de almacenamiento. Esta estrategia es la más adecuada cuando el pico de la carga demandada es grande o cuando el período del pico es corto. (Karim, 2011)

1.5.2 Almacenamiento parcial.

En esta estrategia el chiller trabaja para satisfacer parte del período del pico de carga térmica, el resto de la demanda pico se suple con lo almacenado fuera de este período. El chiller es dimensionado para una capacidad más pequeña que la carga de diseño y trabajará constantemente. (Fig 1.4) Los sistemas de almacenamiento parcial pueden trabajar con nivelación de carga y con limitación de la demanda.

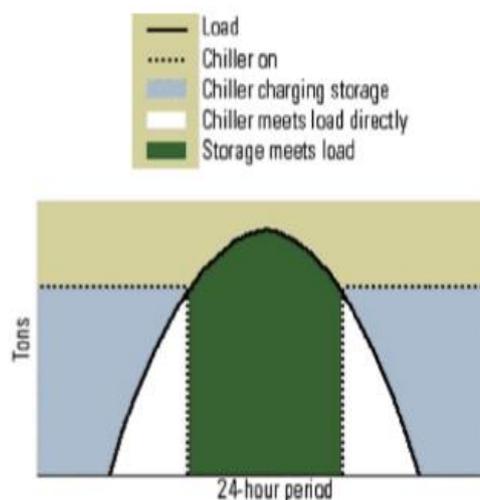


Fig. 1.4-Estrategia de almacenamiento completo. (Álamo, 2007)

1.5.2.1 Almacenamiento parcial con estrategia de funcionamiento por nivelado de carga.

En los sistemas de nivelado de carga, el chiller trabaja a su capacidad máxima las 24 horas del día. Cuando la carga es menor que la capacidad frigorífica del chiller, el excedente de frío es almacenado. Cuando la carga excede la capacidad del chiller, la demanda requerida adicional se toma del frío almacenado. El nivelado de carga se aproxima a los mínimos requerimientos de capacidad de almacenamiento y tamaño del chiller para una carga dada. (Fig.1.5)

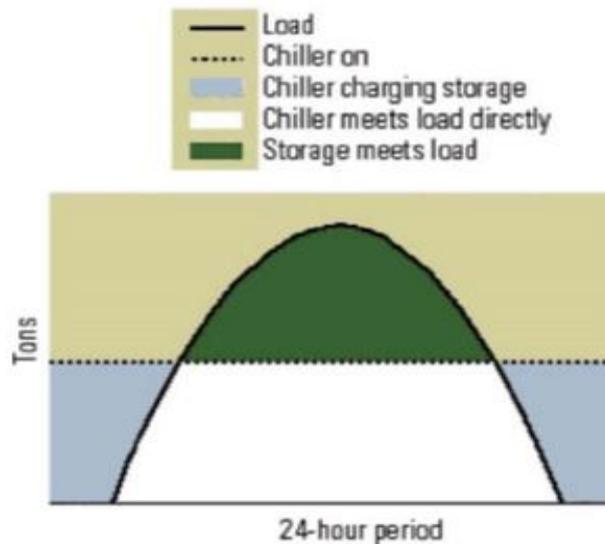


Fig.1.5-Almacenamiento parcial por nivelación de carga. (Álamo, 2007)

1.5.2.2 Almacenamiento parcial con nivelado de carga y limitación de demanda.

Un sistema con limitación de demanda hace operar al chiller a una capacidad reducida durante las horas pico. Los ahorros en la demanda y los costos de los equipos son más grandes que para los sistemas de solo nivelación de carga y menores que para los sistemas de traslado de carga.(Figura 1.6)

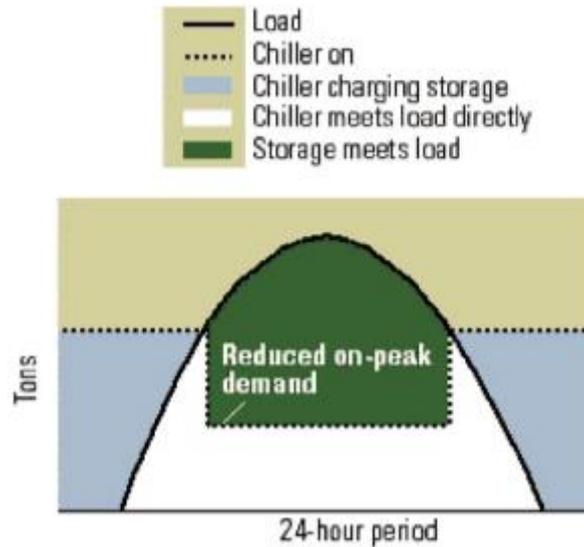


Fig.1.6-Almacenamiento parcial por nivelación de carga. (Álamo, 2007)

Hasta este punto podemos ejemplificar que estos sistemas se aplican con la posibilidad de reducir el tamaño del equipamiento, proporciona mayor seguridad de funcionamiento, mejor aprovechamiento de las tarifas eléctricas y reducción de los picos de carga térmica. Esta característica permite además del ahorro por el costo del equipamiento, aumentar el rendimiento de la planta enfriadora porque trabajan a capacidades uniformes al máximo rendimiento, es un método ideal para incrementar la capacidad de un sistema existente de acondicionamiento de aire. (Lozano, Ramos, & Pino, 2005)

Se origina una mayor fiabilidad en la generación ya que la energía proviene de dos fuentes, constituidas por un lado, por un sistema dinámico de las plantas enfriadoras y por otro, un sistema estático de los tanques de acumulación. En casos de corte de suministro eléctrico, se cuenta con cierto tiempo de seguridad de mantenimiento de la temperatura de confort debido a la carga térmica almacenada y se pueden contemplar paradas de la instalación para realizar mantenimientos de emergencia. (Zhou, 2005)

Durante los períodos fuera de pico, se almacena la energía térmica la que debe estar disponible durante la máxima demanda y en los momentos que se supera el pico de energía eléctrica contratada, se desconecta el equipamiento de acondicionamiento de aire durante el tiempo de autonomía prevista en el diseño del volante térmico. De esa manera, se evita el reajuste de tarifas de las compañías eléctricas con el consiguiente ahorro en los costos energéticos.

En cada simulación se utilizara la estrategia de almacenamiento completo pues es la más efectiva para suplir la demanda completa en el horario pico de tarifa eléctrica comprendido desde las 18:00 hasta las 22:00.

1.6-Ejemplos prácticos de utilización de los TES.

Debido a los beneficios de la implementación de sistemas TES mundialmente a aumentado su utilización ya sea en hospitales, escuelas, universidades, aeropuertos, instalaciones gubernamentales, edificios y en aplicaciones de enfriamiento de procesos ambientales.

Para demostrar que los TES propician el ahorro de energía, reducen el impacto ambiental, y reducen los costos iniciales presentare varios ejemplos comprobados. (I.Dincer, 2001)

Ejemplo 1

En el edificio Anova Verzekering Co ubicado en los Países Bajos, se instaló un TES acuífero subterráneo como una unidad innovadora de acondicionamiento de espacios en una oficina recién renovada, donde se usa una bomba de calor eléctrica para suministrar calefacción y refrigeración hidrónicas.

Con un subsidio de 212,000 dólares por parte del gobierno holandés que representa más del 20% de los costos totales de instalación, pero el ahorro en costos de energía pagara estos costos de inversión adicionales en un periodo de 6 años y medio.

Ejemplo 2

Edificio de la sede de Kraft General Foods (Illinois)

En este edificio se emplea un TES mediante el cual se suplen todas las cargas de aire acondicionado durante el día al derretir hielo; el cual es hecho y almacenado por la noche, y esta agua fría se bombea a las unidades de tratamiento de aire.

Las facturas eléctricas anuales para este edificio son casi 200,000 dólares más bajas que para un edificio idéntico que no utiliza un sistema TES.

Ejemplo 3

Centro de desarrollo de nueva tecnología de Chrysler Motors (Michigan)

En este centro se instaló un sistema TES de agua refrigerada que en un principio permitió que la planta enfriadora se redujera de 17,710 toneladas, que eran necesarias para cumplir con las cargas máximas de refrigeración, a 11,385 toneladas. El agua fría se almacena por la madrugada y complementa las cargas del sistema durante el pico de aire acondicionado al día siguiente.

Este sistema TES desplaza más de 5.000 kW de energía al periodo pico, teniendo como consecuencia un ahorro de 1 millón de dólares anuales.

1.7- Conclusiones parciales.

- Los sistemas de acumulación térmica son utilizados con el objetivo de disminuir la capacidad frigorífica a instalar reduciendo así los costos iniciales de inversión, además se utilizan para desplazar cargas hacia los horarios que de acuerdo a las tarifas eléctricas sean más factibles disminuyendo el monto a pagar por factura eléctrica.
- El empleo de lo TES tienen tanto beneficios económicos; debido al ahorro energético que estos representan, como ambientales; pues disminuyen el efecto invernadero al reducir la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera.
- Para el diseño de un TES se debe tener en cuenta la viabilidad económica, el tipo de almacenamiento los materiales y los métodos de almacenamiento.
- Las estrategias de operación nos permiten establecer un plan para utilizar el sistema ante cada situación, escogiendo la estrategia de acumulación completa como prioridad pues con esta se disminuye el consumo en el horario pico a cero.

Capitulo II. Metodología para diseñar y demostrar el aprovechamiento de los TES.

Para el diseño un sistema de acumulación de agua fría en una instalación hotelera debemos seguir la siguiente metodología:

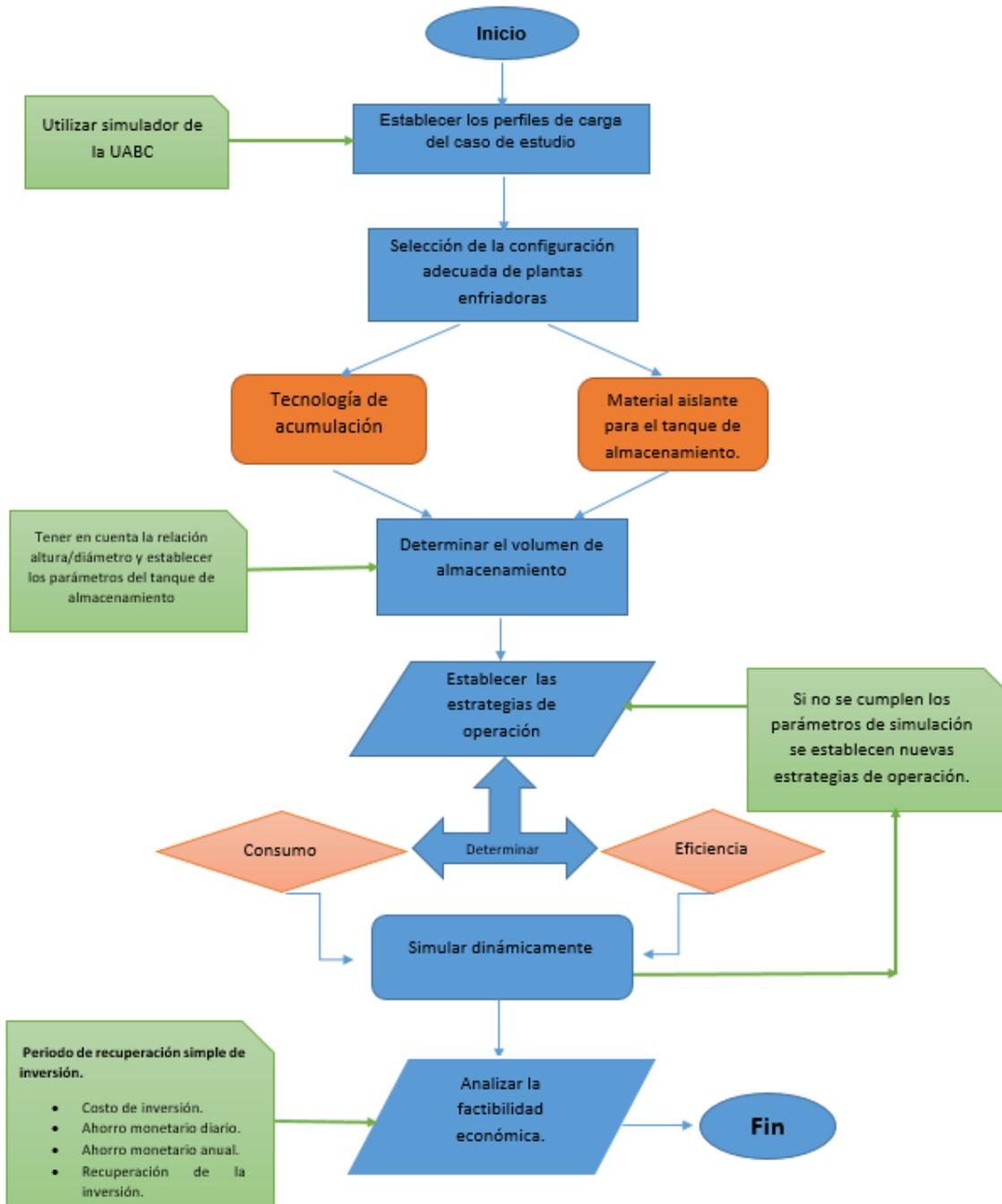


Fig.2.1- Metodología para el diseño de un sistema de acumulación.

2.1-Cálculo de los perfiles de carga.

A la hora de implementar un sistema de acumulación es necesario determinar los perfiles de carga para así saber cuánto podemos almacenar y tener como referencia los picos de demanda para cada escenario descrito.

Estos perfiles se calcularán para ocho situaciones de estudio diferentes que pueden ocurrir hipotéticamente en instalaciones hoteleras.

Para calcular los perfiles de carga de una instalación hotelera utilizamos el simulador desarrollado por la universidad UABC para obtener las cargas térmicas de la instalación durante cada hora del día.

2.1.1- Explicación del funcionamiento del simulador diseñado por la UABC.

Los simuladores térmicos de edificios son programas computacionales que permiten determinar el comportamiento energético y describir características importantes de edificaciones. Tienen un costo inicial elevado además de tener que pagar una patente mientras esté siendo usado. Los paquetes de modelación no permiten el cambio de algunas de las variables que influyen en el cálculo de las cargas térmicas.

El simulador desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) es utilizado en este trabajo por cortesía del Instituto de Ingeniería de dicha Universidad en base a los programas de colaboración entre la UABC y la UCF. Permite este programa entrar en los archivos de datos primarios y poder configurar todos los parámetros climatológicos y constructivos del local así como hacer todas las corridas pertinentes variando los datos que se requieran y obteniendo diferentes comportamientos de las cargas de enfriamiento.

Los aspectos conceptuales y los procedimientos de cálculo que se utilizan en este simulador están basados principalmente en manuales de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE). Estos conceptos y procedimientos, así como la metodología que proponen en el método de Funciones de Transferencia, han sido adaptados a las condiciones y requerimientos regionales, instrumentados con sistemas computacionales e integrados con datos climatológicos y parámetros técnicos y económicos locales, de tal forma que permiten construir paquetes de simulación para casos específicos.

El método de las funciones de transferencia es considerado uno de los más precisos para el cálculo térmico. Otros métodos están considerados como simplificaciones del mismo.

La metodología requiere del uso de funciones de transferencia por conducción y de factores de ponderación, de coeficientes para el cálculo de transmitancia y absorbancia en vidrio y de coeficientes normalizados para funciones de transferencia al aire del espacio, entre otros. Estos factores y coeficientes son obtenidos de bases de datos y de manuales de ASHRAE. (ASHRAE, 2007)

2.1.2- Cálculo de la carga de enfriamiento (SCRW4)

SCRW4 es el nombre del archivo que se emplea en el simulador como pantalla de control de alimentación de información así como de presentación de los resultados de potencia (o también llamada carga de enfriamiento horaria) para cada día analizado. En esta hoja se reportan los requerimientos de enfriamiento una vez integradas todas las ganancias de calor instantáneas y convertidas en potencia de enfriamiento horaria. En este archivo se requiere introducir la temperatura máxima y mínima de diferentes días seleccionados como días seleccionados a conveniencia. Los cuales no son más que aquellos en los que las temperaturas son más elevadas y por lo tanto aportan mayor exactitud al cálculo de la simulación. (Hernández, 2010)

Estos datos se utilizan junto con un modelo tipo función de Fourier para obtener el perfil de temperatura horaria del día en cuestión. Asimismo se requerirán para obtener las correspondientes temperaturas horarias aire-sol.

2.1.3- Obtención de los perfiles de carga.

El objeto de este estudio es un hotel ubicado en clima tropical, compuesto por 87 habitaciones: 3 edificios principales; 3 módulos habitacionales tipo cabañas, un lobby, un módulo de servicios compuesto por: una tienda especializada, un restaurante-cocina, cabaret, y finalmente un área de oficinas (Anexo 2)

Los perfiles de carga horarias se determinan tomando como base el archivo SCRW4 del simulador y se calculan estos de acuerdo a un promedio de las temperaturas máximas y mínimas de acuerdo a los escenarios de simulación. Tabla 2.1

En la construcción de los distintos perfiles de carga se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Asumir el estado de confort para una humedad relativa dentro de las zonas del 50% y una temperatura máxima de 24°C. Simular la demanda térmica para 24 horas correspondiente a un día típico de verano.
2. Aplicar el concepto de habitación "parcialmente cargada" (habitaciones desocupadas pero acondicionadas con una temperatura de 26 °C). Con el objetivo de minimizar el impacto de los altos niveles de humedad que afectan a las instalaciones construidas en zonas de clima tropical.
3. Simular tasas de ocupación del 50 %, 75 % y 100% para el hotel.
4. Eliminar diversidad de las cargas aplicando las siguientes estrategias operacionales: Con el 75% de ocupación, (65 habitaciones) ocupar las habitaciones de menor demanda térmica: Los módulos 1,2,3 y 20 habitaciones de las Cabañas intermedias, el resto de las habitaciones parcialmente cargadas. Con el 50 % de ocupación, (44 habitaciones) los módulos bungalow 1,2,3 ocupados. El resto serán habitaciones parcialmente cargadas.
5. Concepto de hotel de transito: ofrece servicios de desayuno y comida para los huéspedes, hotel que generalmente no se ocupa en horario diurno (habitaciones) (Ma S. W., 2008)

Tabla 2.1- Diferentes escenarios de ocupación empleados en un hotel para 24 horas.

Escenarios	Esquemas de ocupacion (tiempo de servicio)					Observaciones
	habitaciones	horario			Areas de servicio	
		restaurantes	cabaret	tiendas		
1	00:00-24:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	00:00-24:00	00:00-24:00	00:00-24:00	Escenario critico, 100 % de ocupacion durante las 24 horas, altas tasas de ganancia de calor por concepto de empleo de equipos
2	vacancy	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	vacancy	09:00-22:00	08:00-17:00	Escenario critico, minima demanda termica , tasa de ocupacion inferior al 10 % , solo se ofrecen servicio de restaurante y tiendas.- 90 % habitaciones parcialmente cargada

3	00:00- 23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00- 02:00	09:00- 22:00	08:00-17:00	Hotel con 100 % de ocupación , las areas publicas y areas de servicio con tiempo de trabajo limitado
4	00:00- 23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00- 02:00	09:00- 22:00	08:00-17:00	Hotel con 75 % de ocupación, las areas publicas y servicio con tiempo de trabajo limitado
5	00:00- 23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00- 02:00	09:00- 22:00	08:00-17:00	Hotel con 50% de ocupacion las areas publicas y areas de servicio con tiempo de trabajo limitado
6	00:00- 10:00, 16:00- 23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00- 02:00	09:00- 22:00	08:00-17:00	Hotel de tránsito. 100 % de ocupación. Las areas de servicios ofrecen servicios generales (no solo a huéspedes) . Desde las 07:00 hasta 16:00 horas habitaciones parcialmente cargadas.
7	00:00- 10:00, 16:00- 23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00- 02:00	09:00- 22:00	08:00-17:00	Hotel de tránsito 75 % de ocupación. Las areas de servicios ofrecen servicios generales (no solo a huéspedes) . Desde las 07:00 hasta 16:00 horas habitaciones parcialmente cargadas.
8	00:00- 10:00, 16:00- 23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00- 02:00	09:00- 22:00	08:00-17:00	Hotel de tránsito 50% de ocupación. Las areas de servicios ofrecen servicios generales (no solo a huéspedes) . Desde las 07:00 hasta 16:00 horas habitaciones parcialmente cargadas.

2.2-Metodologia para el diseño de la planta de enfriadoras para un hotel.

Para el dimensionamiento de una planta de enfriadoras para un hotel utilizamos la metrología propuesta en una investigación previa realizada (Torres, Calvo, Justiz, DrC, & Sarduy, 2019), donde se plantea una metodología para la generación de alternativas de plantas de enfriadoras, la cual se puede observar en la figura 2.2.

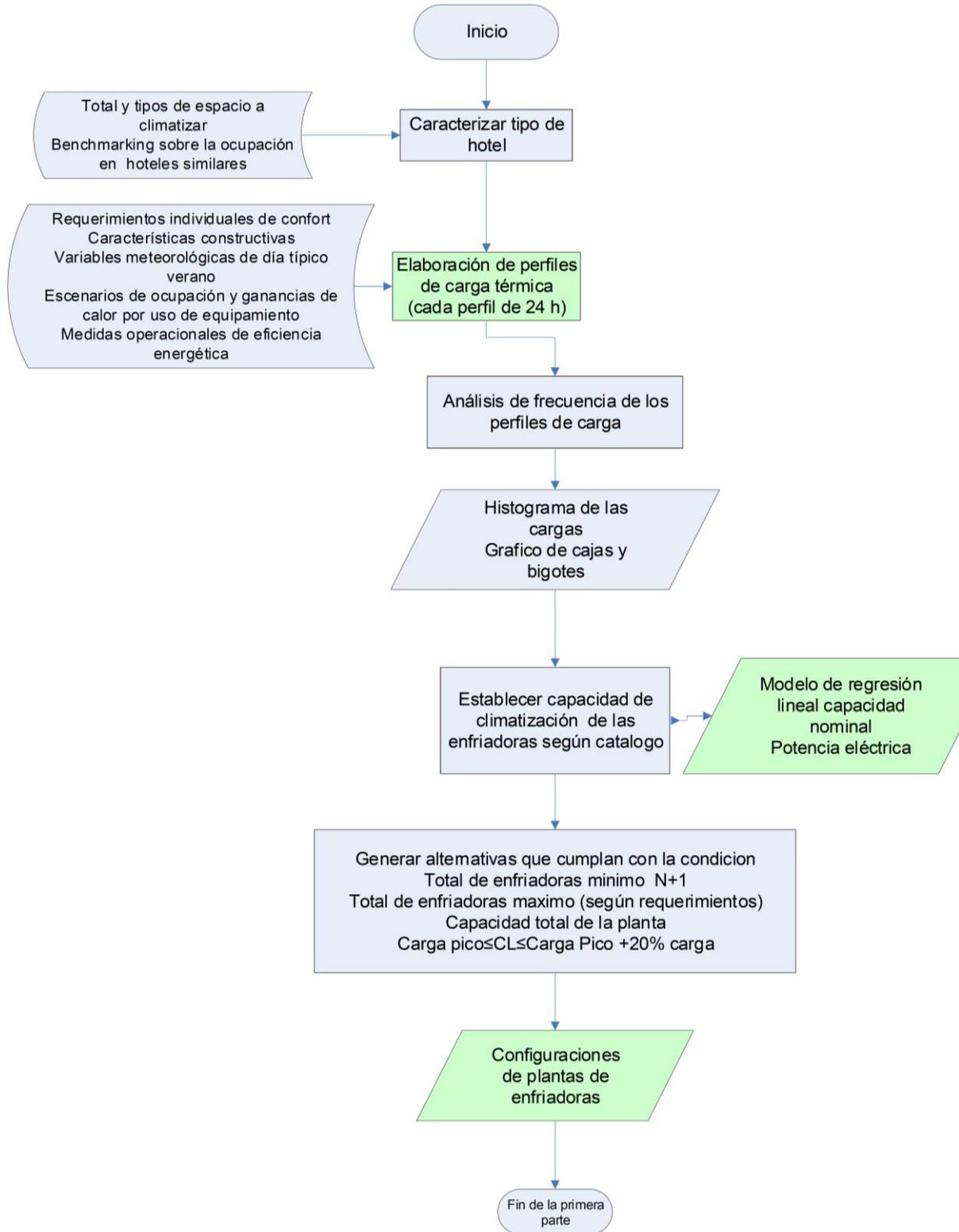


Fig. 2.2- Metodología para la generación de alternativas de plantas enfriadoras. (Torres, Calvo, Justiz, DrC, & Sarduy, 2019)

Mediante la metodología antes referenciada se obtienen como resultado un total de 17 alternativas de plantas enfriadoras, 5 alternativas compuestas por 2 enfriadoras y 12 alternativas por 3 enfriadoras. Tabla 2.1.

Tabla 2.2- Configuraciones de enfriadoras

Nro.	Chiller 1	Chiller 2	Chiller 3	Capacidad total del sistema(kW/h)
1	1	7	-	505.5
2	2	7	-	572.5
3	4	6	-	541.0
4	5	5	-	518.0
5	5	6	-	581.3
6	1	1	7	555.58
7	1	2	6	489.31
8	1	3	6	527.93
9	1	4	5	527.66
10	1	5	5	568.02
11	2	2	5	492.88
12	2	2	5	556.24
13	2	3	6	491.15
14	2	3	4	531.51
15	2	4	5	554.24
16	2	3	4	529.77
17	3	3	5	570.13

De las siguientes configuraciones la que utilizo como punto de partida para el diseño del sistema de acumulación de agua fría para el caso de estudio presentado es la configuración 14, compuesta por tres enfriadoras.

2.3-Selección del tipo de tecnología a utilizar para la acumulación.

Como se expresó anteriormente los sistemas de acumulación se clasifican en latentes, sensibles y termoquímicos en dependencia del calor que almacenan.

Para la siguiente metodología se utilizan los **sistemas acumulación de frío por calor sensible** ya que estos generalmente utilizan agua como medio de almacenamiento y se conocen como sistemas de agua fría la cual se almacena en grandes tanques.

Estos sistemas de almacenamiento por agua fría tienen como ventajas:

- Se utilizan chillers estándar

- Manejo eficiente
- Económico para sistemas grandes
- Fiable
- Simple
- Puede utilizarse como protección contra incendios

En estos sistemas el agua de los tanques de almacenamiento la cual está a temperatura ambiente es enfriada hasta la temperatura deseada por los chiller y luego retorna al dispositivo de almacenaje (carga), luego esta es bombeada desde el tanque a la carga y el agua caliente resultante retorna. Para mantener el agua de retorno separada del agua fría almacenada previamente se utilizan separadores, tanques con compartimentos, laberintos o simplemente la descarga de agua fría se pone en la zona inferior del tanque y la carga de agua caliente por la superior. (Figura 2.3)

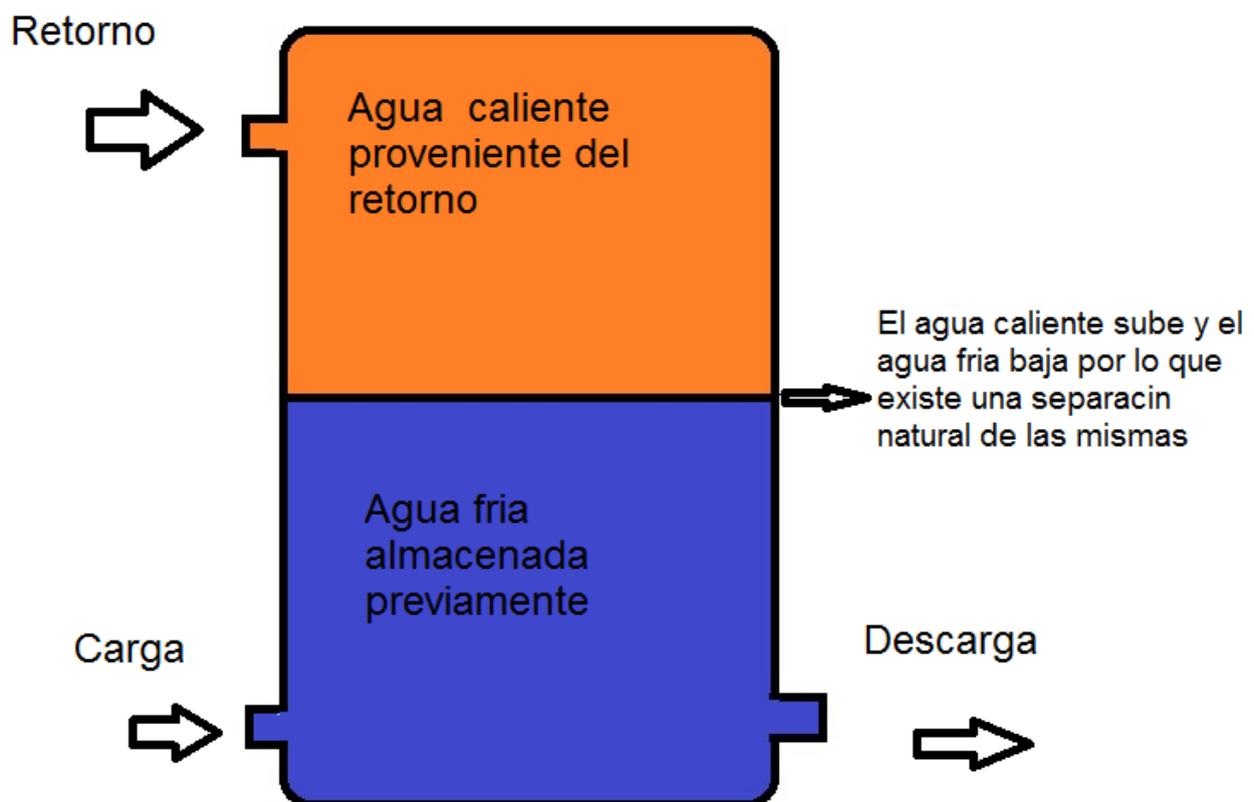


Fig. 2.3-Esquema aproximado de un tanque simple

2.4- Selección del material aislante para el tanque.

Los aislantes térmicos son aquellos materiales cuya función es la de reducir la transmisión de calor a través de la estructura sobre la que se instala.

Existen diversas clasificaciones de los aislantes térmicos por ejemplo, en cuanto al material aislante en sí o en cuanto al formato en el que se presenta. En cuanto al material como aislante térmico podemos diferenciar entre:

Aislantes sintéticos. Son aquellos compuestos por materiales sintéticos como el plástico, los polímeros procedentes del petróleo y otros materiales sintéticos. Son muy efectivos térmicamente. Los más comunes son:

- **Polietileno expandido (EPS).** Es uno de los aislantes más utilizados por su densidad y baja conductividad térmica.
- **polietileno extruido (XPS).** Muy similar al anterior, pero con la ventaja de que se puede mojar sin problema ya que es muy absorbente. Se utiliza con frecuencia por sus múltiples aplicaciones.
- **Poliuretano.** Tiene un mayor rendimiento térmico que los anteriores, pero se usa generalmente proyectado como espuma.
- **Rollos reflexivos.** Son rollos formados por una o varias capas, de grosor variable, de burbujas de polietileno entre varias finas láminas de aluminio utilizados especialmente en zonas climáticas suaves.

Lanas minerales. Es el material aislante más empleado. (Jareño, 2012) Son productos aislantes constituidos por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un fieltro que mantiene entre ellos aire en estado inmóvil. Resultan muy versátiles y eficaces ya que además de proporcionar un buen nivel de aislamiento térmico también actúan como aislamiento acústico y ofrecen un elevado nivel de protección contra el fuego. Dentro de las lanas minerales se distinguen fundamentalmente dos tipos:

- **Lana de roca o lana mineral (SW).** Se fabrica a partir de roca volcánica y se presenta en forma de manta, panel no rígido o rollo. Se utiliza en cubiertas, forjados, fachadas, suelos, falsos techos, buhardillas o tabiques interiores.
- **Lana de vidrio (GW).** Se fabrica fundiendo arena a altas temperaturas y su estructura está formada por finas fibras de vidrio unidas por un aglomerante o resina. Se

considera mejor aislante acústico que la lana de roca y resiste mejor a la humedad. Al ser más liviana que otros aislantes y de muy baja conductividad térmica, consigue una mayor eficiencia con el mismo espesor.

Aislantes ecológicos o naturales. Su uso está cada vez más extendido porque no contienen sustancias ni aditivos y por tanto son más respetuosos con el medio ambiente. Este tipo de aislantes, además, son reciclables y biodegradables. Los aislantes naturales más comunes son:

- **Corcho.** Es el de mayor aceptación porque además de sus buenas propiedades como aislante es reciclable y renovable. Se presenta en diferentes formatos; en forma de virutas para rellenar cavidades, en forma de paneles de corcho prensado o incluso proyectado para cubiertas o revestimiento de superficies.
- **Lino.** Procede de una planta de fácil cultivo de la que se obtienen fibras reciclables que se utilizan como aislante.
- **Celulosa.** Formada por residuos de papel que se reciclan en forma de aislante para su aplicación por insuflado en cámaras, trasdosados o sobre forjados.
- **Lana de oveja.** Aislante de procedencia animal que cuando se humedece mejora su capacidad de aislamiento.
- **Arlita, perlita y vermiculita.** Son aislantes minerales muy frecuentes en la construcción tradicional y de gran capacidad ignífuga.
- **Fibra de coco y el algodón.** También se utilizan como aislantes naturales en forma de mantas.

2.5- Determinación del volumen de almacenamiento.

Se decidió utilizar a partir de la búsqueda bibliográfica un sistema de acumulación por agua enfriada y la estrategia de almacenamiento completo con la que se pretende trasladar la carga demandada en el horario pico hacia el horario de la madrugada, donde la tarifa eléctrica es más económica.

Hay que tener en cuenta la carga que es posible entregar por lo chillers de acuerdo a la carga demandada por hora en cada escenario. Para satisfacer todas las situaciones se utilizaran tres chiller con diferentes cargas. Tabla 4

Además se utilizan como referencia los valores propuestos por la Guía de Diseño ASHRAE para Almacenamiento de Frío (ASHRAE, 2007)Tabla 5- Donde se muestra un resumen de los valores recomendados según el medio de almacenamiento.

Tabla 2.4- Dimensionado del tanque para las diferentes técnicas de acumulación (ASHRAE, 2007)

Medio de almacenamiento	Volumen (m ³ /TR-h)	Temperatura de almacenamiento (°C)	Temperatura de descarga (°C)	Ventajas
Agua fría	0,3 – 0,6	3,9 – 6,6	5 – 7,7	Pueden emplearse chillers ya existentes; el agua del tanque de almacenamiento puede emplearse como protección contra incendios
Hielo	0,068 – 0,093	0	1,1 – 2,2	Altas tasas de descarga; gran potencial para sistemas de aire a baja temperatura
Sales eutécticas	0,17	8,3	8,8 – 1	Pueden emplearse chillers ya existentes

Luego este potencial máximo de acumulación se convierte a TR-h y se multiplica por un valor en el rango de 0.3-0.6 (m³/TR-h) de acuerdo al medio de almacenamiento que es agua fría, utilizando generalmente 0.45 por ser un valor medio.

$V_{tanque} = 0.45 \times \text{potencial de acumulación en TR-h}$

2.5.1- Relación altura/diámetro con la que se conseguirían minimizar las pérdidas térmicas.

Para minimizar las pérdidas térmicas en los tanques de almacenamiento lo más conveniente sería elegir el diámetro y la altura que lograsen minimizar la superficie de los tanques, pues cuanto menor sea la superficie de intercambio de calor entre el tanque y el ambiente menor será la potencia térmica de pérdidas hacia el exterior de los tanques. La superficie mínima de un tanque de almacenamiento se consigue con un valor específico del cociente H_{tan}/D_{tan} (altura del tanque entre diámetro del tanque). Dicho valor se puede determinar mediante las ecuaciones correspondientes al volumen nominal y a la superficie de un tanque de almacenamiento cilíndrico y con techo plano (Varios, 2015):

$$V_{tanque} = \pi \times \frac{D_{tanque}^2}{4} \times H_{tanque} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$\text{Superficie tanque} = \pi \times D_{\text{tanque}} \times H_{\text{tanque}} + \pi \frac{D_{\text{tanque}}^2}{2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Se puede observar que la superficie de un tanque está en función de su altura y diámetro. No obstante, como el volumen nominal del tanque es un valor conocido y constante para cada alternativa de capacidad de almacenamiento, podemos expresar la superficie del tanque únicamente en función de su diámetro:

$$\text{Superficie tanque} = \frac{4 \times V_{\text{tanque}}}{D_{\text{tanque}}} + \pi \times \frac{D_{\text{tanque}}^2}{2} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Derivando la ecuación 2.3 con respecto al diámetro de los tanques e igualando a cero se obtiene la relación $H_{\text{tanque}}/D_{\text{tanque}}$ que buscábamos:

$$\frac{d(\text{Superficie tanque})}{d D_{\text{tanque}}} = \pi \times D_{\text{tanque}} - 4 \times \frac{V_{\text{tanque}}}{D_{\text{tanque}}^2} \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$\frac{d(\text{Superficie tanque})}{d D_{\text{tanque}}} = \pi \times D_{\text{tanque}} - 4 \times \frac{V_{\text{tanque}}}{D_{\text{tanque}}^2} = 0 \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$D_{\text{tanque}}^3 = \frac{4 \times V_{\text{tanque}}}{\pi} = D_{\text{tanque}}^2 \times H \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$\frac{H_{\text{tanque}}}{D_{\text{tanque}}} \approx 1 \quad \text{Ec. 2.7}$$

2.6- Requerimientos del servicio eléctrico. Costos del consumo energéticos producto a las tarifas horarias.

Actualmente las tarifas de precios que rige el servicio eléctrico nacional están detalladas en la resolución No. 28-2011 del Ministerio de Finanzas y Precios. Esta puede aplicarse en Pesos Cubanos o en Pesos Cubanos Convertibles, según la moneda de pago establecida para cada cliente.

El sistema tarifario eléctrico está formado por tres grandes grupos de tarifas que se aplican a los clientes que están conectados a la red, estos son: Alta Tensión, Media Tensión y Baja Tensión. Cada uno de estos grupos cumple con diferentes normativas². Esta resolución, efectuada en el 2011, puntualiza nuevas medidas. Implementa un nuevo Factor K, para ajustar las tarifas en función de la variación del precio de la tonelada de los combustibles

(fuel oil, crudo y diesel) usados en la generación de electricidad. Caracteriza también el factor de potencia, penalizando al cliente si es menor de 0.90, y se bonifica de 0.92 a 0.96. Para factores de potencia entre 0.90 y 0.92, no se bonifica ni se penaliza.

En esta resolución la tarifa que rige el coste de la energía en el hotel se clasifica por el grupo M, específicamente, tarifa M1-A3. Aplicada para todos los servicios de consumidores clasificados como de Media Tensión con actividad de 20 horas diarias o más.

2.7- Eficiencia Energética.

La eficiencia energética en un sistema de acumulación térmica está dada por la relación carga contra consumo. El coeficiente de operación (COP) nos da una idea de la eficiencia con que está operando el TES.

Primeramente debemos calcular el consumo de cada enfriadora ante cada escenario de simulación mediante la ecuación 2.8, 2.9 y 2.10 .

$$C_{enfriadora1} = 4.11336 + 2.47673 * \frac{plr * Q}{\eta * 4.18} + 0.836349 * T \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$C_{enfriadora2} = 4.72502 + 3.98478 * \frac{plr * Q}{\eta * 4.18} + 1.1091 * T \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$C_{enfriadora3} = 14.6617 + 2.83545 * \frac{plr * Q}{\eta * 4.18} + 1.43769 * T \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

- η - flujo másico
- plr - se utiliza siempre uno debido a que las enfriadoras trabajaran a máxima capacidad.
- Q - capacidad nominal de cada enfriadora.
- T - la temperatura en cada hora del día

Una vez calculado el consumo de cada enfriadora mediante la ecuación 2.11 procedemos a calcular la carga entregada por cada enfriadora.

$$Carga = plr * Capacidad\ nominal\ de\ cada\ enfriadora \quad \text{Ec. 2.11}$$

Luego como el COP no es más que la relación carga contra consumo tenemos que:

$$COP = \frac{Carga}{consumo} \quad \text{Ec. 2.12}$$

El COP lo calculamos para cada hora del día de simulación y para cada enfriadora, después realizamos un promedio diario del mismo y así tenemos el COP diario. Este valor lo multiplicamos por la eficiencia de los tanques y así obtenemos la eficiencia general del sistema. (Homs, 2009)

2.8-Conclusiones parciales

- La tecnología a utilizar será la acumulación de energía en un sistema de a acumulación de agua fría debido a lo fácil de su utilización e instalación, y a las ventajas que ofrece ya que no requiere grandes cambios en las instalaciones existentes.
- Las cargas de enfriamiento varían de acuerdo al escenario de estudio, estas cargas se calculan utilizando el software creado por la UACB.
- Es necesario determinar la acumulación máxima de energía que el sistema puede acumular para calcular así el volumen de almacenamiento necesario.

Capítulo III. Estudio de factibilidad de la utilización de técnicas de acumulación de frío en instalaciones turísticas.

3.1-Detalles generales del caso de estudio.

Para el estudio de factibilidad se tomó como instalación de prueba un hotel a partir del cual se procede a dimensionar una planta enfriadora considerando diversos escenarios futuros de ocupación, para así determinar la mejor configuración posible de plantas enfriadoras capaces de trabajar con mejor eficiencia y mínimo consumo energético.

3.1.1-Resultados de la simulación de cargas térmicas.

Al introducir todos los datos constructivos y de operación en el simulador térmico de la UABC, se obtienen 8 perfiles de carga térmica del hotel evaluados a partir de los supuestos anteriores. Ver figura 8. Las cargas térmicas oscilaron entre 73,67-488,26 kW como se presentan en la figura 3.1. (Torres, Calvo, Justiz, DrC, & Sarduy, 2019)

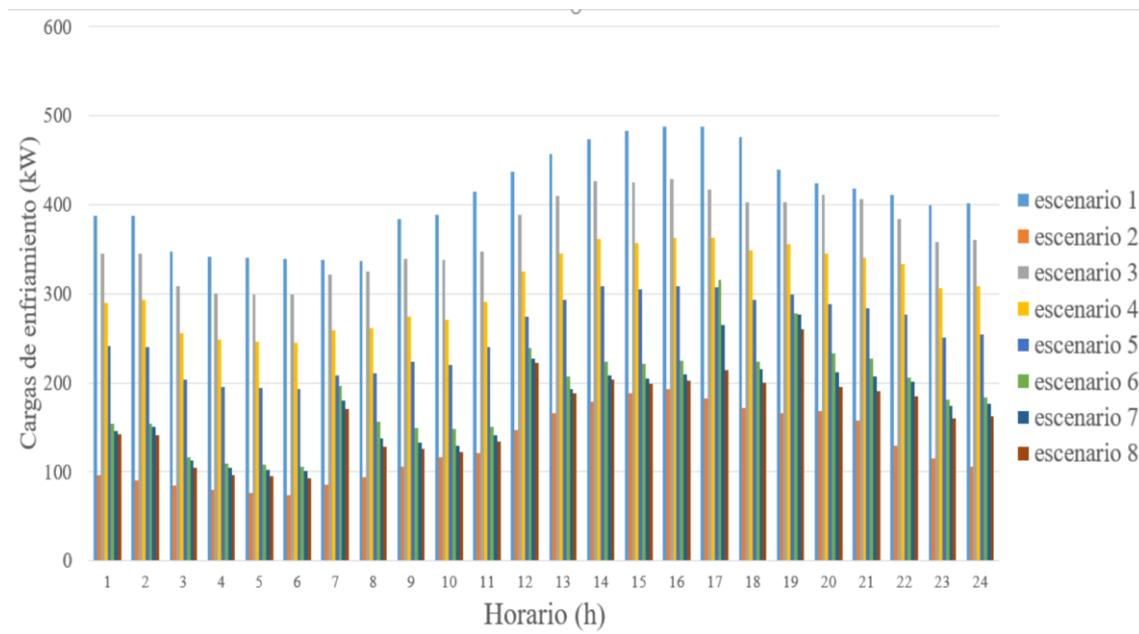


Fig.3.1- Comportamiento de los perfiles de carga para 24horas de trabajo

En la tabla se muestran los perfiles de carga en kW para cada escenario de simulación estudiado, determinados a partir del simulador diseñado por la UABC.

Tabla 3.1- Perfiles de carga.

hora	Escenarios de simulación							
	carga maxima	carga minima	escenario 3	escenario 3,1	escenario 3,2	escenario 4	escenario 4,1	escenario 4,2
1	387,74	96,04	345,74	289,297978	241,297978	154,79	146,447978	142,447978
2	387,38	90,41	345,5	293,558602	240,438602	154,19	150,378602	141,258602
3	347,84	84,47	308,2	255,957513	203,317513	117,04	112,927513	104,287513
4	342,1	79,59	300,86	248,024528	195,664528	109,07	104,524528	96,3645281
5	340,69	76,32	299,47	245,88143	194,00143	107,8	102,50143	94,8214304
6	339,16	73,67	299,01	245,122517	193,562517	105,96	100,582517	93,4225173
7	338,36	85,59	321,25	259,685345	208,605345	196,54	180,095345	170,415345
8	337,45	94,15	324,88	261,633889	211,113889	156,4	137,893889	128,373889
9	383,76	105,42	339,18	273,981482	223,421482	150,03	132,461482	125,501482
10	388,71	115,99	337,89	270,955986	220,595986	148,47	129,135986	122,375986
11	415,22	120,71	347,08	290,721761	239,841761	150,19	141,461761	134,181761
12	436,97	147,52	388,49	325,387281	274,347281	239,18	227,257281	223,017281
13	456,91	166,02	410,54	344,89776	293,53776	207,44	193,00776	188,44776
14	473,62	179,5	427,18	361,4501	309,2501	223,27	208,7501	203,3501
15	483,59	187,89	425,09	357,583817	304,903817	220,91	204,773817	199,093817
16	488,26	192,69	429,24	362,48442	309,00442	225	209,61442	203,13442
17	487,54	182,4	417,64	362,430329	307,990329	315,73	264,880329	214,840329
18	476,32	171,97	402,85	349,183791	293,423791	224,23	215,083791	200,123791
19	439,19	165,65	402,86	356,052128	299,132128	278,36	276,512128	260,792128
20	424,56	168,73	410,88	345,47408	288,27408	232,83	212,25408	196,05408
21	418,87	158,23	406,21	340,413842	283,373842	227,59	206,813842	190,973842
22	411,23	129,84	384,29	333,798629	277,398629	206,63	200,848629	185,448629
23	399,14	115,54	358,72	306,887537	251,487537	181,54	174,257537	159,657537
24	401,53	105,8	360,86	309,271112	254,511112	183,68	176,641112	162,681112

3.2-Volumen de almacenamiento de agua fría.

Potencial máximo de acumulación (kW) = 1859.51

Lo divido por 3.75 para llevarlo a TR-h = 495.868

Le aumento el 5% para mayor seguridad= 520 TR-h

Factor de multiplicación = 0.45 m³/TR-h

$V_{Tanque} = 0,45 * TR - h$

Ec. 3.1

$V_{Tanque} = 0,45 * 520$

$V_{Tanque} = 234 m^3$

Este volumen se puede repartir en diferentes tanques en este caso se repartirá en dos tanques de 117m³ cada uno para un mejor aprovechamiento del almacenamiento, lo cual significa que cada uno puede almacenar aproximadamente 975 kW/h de energía.

3.2.1- Cálculo de la relación altura/diámetro óptima para minimizar las pérdidas térmicas.

Partiendo de la ecuación 2.1 y el diámetro de cada tanque (117m³) asumimos una altura de los tanques de 5m aproximadamente por lo que despejamos el diámetro en la ecuación de la siguiente manera:

$$V_{tanque} = \pi \times \frac{D_{tanque}^2}{4} \times H_{tanque}$$

$$V_{tanque} = 3.14 \times \frac{D_{tanque}^2}{4} \times 5$$

$$\frac{117 \times 4}{3.14 \times 5} = D_{tanque}^2$$

$$\sqrt{\frac{117 \times 4}{3.14 \times 5}} = D_{tanque}$$

$$5.45 m = D_{tanque}$$

Luego planteamos la relación altura/ diámetro mediante la ecuación 2.7 y mientras más se acerque el valor a uno menor será las pérdidas térmicas.

$$\frac{H \text{ tanque}}{D \text{ tanque}} \approx 1$$

$$\frac{5}{5.45} \approx 1$$

$$0.917 \approx 1$$

Dando así una relación de 0.917 la cual es muy buena para un tanque cilíndrico.

Es necesario considerar que el sistema está aislado térmicamente lo suficiente para que el calor hacia el interior del tanque tienda a cero. (Anexo 3)

3.3- Estrategias de operación a emplear ante cada escenario.

La estrategia de operación que se emplea es la de acumulación completa para mover la carga al horario pico de acuerdo a los perfiles de carga previamente calculados por es software creado por la UACB para cada escenario.

Debemos tener en cuenta que en todos los casos las pérdidas térmicas se desprecian y todas las enfriadoras trabajaran al 100 % de su capacidad y carga parcial térmica igual a uno (PLR).

3.3.1- Para carga máxima.

De 1:00 – 3:00 h trabajan las enfriadoras 2 y 3 luego acumulando 92.03 kW de energía, luego en el horario de 3:00- 18:00h se ponen la tres en marcha acumulando 1757.57 kW, en el horario pico de 18:00-22:00h se apaga todo el sistema y la demanda energética en el mismo que es de 1758.94 kW se supe con la energía acumulada en los dos tanques durante el trayecto del día y de 22:00-24:00 trabajan las enfriadoras 2 y 3 nuevamente. (Anexo 4)

- 1:00-3:00 ----- 92.03 kW
- 3:00-18:00-----1757.57 kW
- 22:00-24:00----- 9.91 kW
- Total acumulado----- 1859.51 kW
- Demanda ----- 1758.94 kW

Como el total acumulado es mayor que la demanda en el horario pico la estrategia de operación a seguir es factible.

Además vemos que el consumo diario utilizando un sistema de acumulación de agua fría es de 2820.03 kW al día mientras que utilizando solo las tres enfriadoras es de 3182.3kW, por lo que implementando esta tecnología se ahorra 362.27 kW al día en un escenario de carga máxima demandada.

3.3.2-Carga mínima.

Se comienza trabajando con el chiller 2 de 1:00 -17:00 y de 17:00-18:00 se apaga el 2 y se enciende el 1, en el horario pico (18:00-22:00) se apagan todos los sistemas y la carga demanda se abastece con lo almacenado en un tanque, después de este horario hasta las 24:00 se trabaja nuevamente con el chiller 1.

- 1:00-13:00-----se acumula 852.70 kW
- 13:00-18:00-----el pico de demanda excede en 123.35 kW a la carga entregada por la enfriadora, pero esta se suple con lo acumulado en el primer período.
- 22:00-24:00-----se acumula 31.93 kw
- Total acumulado----- 761.27 kw
- Demanda horario pico----- 664.58 kW

Por tanto es posible utilizar la estrategia de acumulación completa, donde se consume en un día con carga mínima sin la utilización de un TES 1113.71 mientras que con la utilización de estos sistemas se consume 962.13 significando un ahorro de 151.58.(Anexo 5)

3.3.3- Escenario 3

Comienzo utilizando el chiller 2 y 3 de 1:00-10:00 y en el horario de 10:00-18:00 trabajan las tres enfriadoras almacenando durante todo este periodo 1803.41kW en ambos tanques de almacenamiento, en el horario pico 18:00-22:00 se utiliza la estrategia de carga completa y se apagan las enfriadoras y la demanda (1622.58 kW) se anula con lo acumulado. Después hasta las 24:00 se trabaja con la 2 y la 3 nuevamente pero en la primera hora de 22:00 a 23:00 la demanda excede a la carga entregada en 121.86 kW energía que se suple nuevamente con la almacenada nuevamente. (Anexo 6)

- 1:00-18:00-----se almacena 1803.41 kW
- 18:00-22:00-----demanda 1622.58 kW

- 22:00-23:00-----demanda 121.86 kW

Σ Almacenado \geq Σ Demandado \rightarrow se cumple la estrategia

3.3.4- Escenario 3.1

Se ponen en marcha de 1:00-10:00 los chiller 1 y 3 luego de 10:00-18.00 se apaga el 1 y se enciende el 2. Comenzando el horario pico se apaga todo y a las 22:00 se encienden lo chiller 2 y 3 hasta el final del día. (Anexo 7)

La energía almacenada durante el primer tamo del día (1:00-18:00) no es suficiente para satisfacer la demanda en el horario pico por si sola por lo que a esta se le suma la almacenada de 22:00-24:00 que se cuenta como energía almacenada del día anterior.

- 1:00-18:00-----se almacena 1452.67 kW
- 22:00-24:00-----se almacena 194.42 kW
- 18:00-22:00-----demanda 1622.8 kW

Cumpléndose así que la energía almacenada que en este caso es en los dos tanques es mayor que la demandad en el horario pico.

3.3.5-Escenario 3.2

Para este escenario la estrategia la mostraremos a partir de la tabla 3.1. (Anexo 8)

Tabla 3.1- Estrategia de operación para el escenario 3.2

Periodo de horario	Chiller trabajando	Energía almacenada(kW/h)	Demanda(kW/h)
1:00-2:00	1 y 3	245.24	-
2:00-6:00	3	160.88	-
6:00-17:00	1 y 3	1072.92	-
17:00-22:00	-	-	1479.93
22:00-24:00	1 y 2	84.13	-
Total	-	156318	1479.93

Σ Almacenado \geq Σ Demandado \rightarrow se cumple la estrategia

Como se muestra en la tabla las enfriadora dejan de trabajar una hora antes del horario pico ya que lo almacenado es mucho mayor que la demanda en el horario pico, por lo que se puede incluso suplir la demanda de una hora más al día.

3.3.6-Escenario 4

En este caso de estudio se trabaja con el chiller 3 a máxima carga de 1:00-18:00 y se detiene el mismo de 18:00-22:00, después de 22:00-24:00 se vuelve a poner en marcha. (Anexo 9)

Tabla 3.2-Estrategia de operación para el escenario 4

Periodo de horario	Chiller trabajando	Energía almacenada(kW/h)	Demanda(kW/h)
1:00-16:00	3	1108.86	-
16:00-17:00	3	-	78.87
17:00-18:00	3	12.63	-
18:00-22:00	3	-	963.01
22:00-24:00	3	108.49	-
Total	-	1229.98	1041.88

Σ Almacenado \geq Σ Demandado \rightarrow se cumple la estrategia

En el horario de 16:00-17:00 existe un pico de demanda ya que esta es mayor que la carga entregada por la máquina, este se suple fácilmente con lo almacenado.

3.3.7-Escenario 4.1

En este caso utilizaremos el chiller tres a máxima carga durante todo el día acumulando suficiente energía como para mantener el sistema apagado desde las 16:00-22:00 horas. (Anexo 10)

Tabla 3.3- Estrategia de operación para el escenario 4.1

Periodo de horario	Chiller trabajando	Energía almacenada(kW/h)	Demanda(kW/h)
1:00-16:00	3	1293.32	-
16:00-22:00	-	-	1390.63
22.00-24:00	3	122.81	-
Total	-	1416.14	1390.63

Σ Almacenado \geq Σ Demandado \rightarrow se cumple la estrategia

3.3.8-Escenario 4.2

Utilizaremos la tabla para representar como se opera para cumplir con l estrategia de acumulación completa.(Anexo 11)

Tabla 3.4- Estrategia de operación para el escenario 4.2

Periodo de horario	Chiller trabajando	Energía almacenada(kW/h)	Demanda(kW/h)
1:00-10:00	2	465.06	
10:00-18:00	3	277.36	
18:00-22:00	-	-	847.94
22:00-23:00	1 y 2	135.41	
23:00-24:00	3	5.75	
Total	-	883.58	847.94

Una vez más se cumple que el total almacenado es mayor que la demanda en el horario pico por lo que es posible utilizar la estrategia de almacenamiento completo.

3.4- Determinación del consumo

A partir de los valores presentados en la tabla- 3.5 y utilizando la ecuación de consumo para cada enfriadora calculamos la energía consumida por cada enfriadora durante cada hora del día en dependencia de cómo se utilizaron ante cada escenario de simulación.

Tabla 3.5-Valores de temperatura, flujo másico y capacidad nominal de cada chiller.

hora	temperatura ambiente(°C)	flujo másico enfriadora 1(kg/s)	flujo másico enfriadora 2(kg/s)	flujo másico enfriadora 3(kg/s)	capacidad nominal 1(kW/h)	capacidad nominal 2 (kW/h)	capacidad nominal 3(kW/h)
1	24,2	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
2	23,9	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
3	23,7	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
4	23,6	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
5	23,7	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
6	23,6	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
7	23,4	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
8	24,1	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
9	24,9	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
10	26,4	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
11	27,8	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
12	29,8	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
13	30,4	5,97222222	10	13,0555556	125,858	167,40331	235,4
14	31,4	5,97222222	10	13,0555556	123,91925	164,82956	231,75875
15	31,6	5,97222222	10	13,0555556	123,5315	164,31481	231,0305
16	30,6	5,97222222	10	13,0555556	125,47025	166,88856	234,67175
17	24,7	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
18	23,8	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
19	24,3	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
20	24,4	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
21	24,8	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
22	25	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
23	24,4	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565
24	23,9	5,97222222	10	13,0555556	126,6335	168,43281	236,8565

Una vez calculado el consumo mediante las ecuaciones 2.8 , 2.9 y 2.10 obtenemos como resultado:

Tabla 3.6- Consumo (kW-h) para cada escenario.

Horas	Consumo en kW/h							
	Carga Máx.	Carga Min.	Esc 3	Esc 3.1	Esc 3.2	Esc 4	Esc 4.1	Esc 4.2
1	109,28	47.62	109.32	98.62	98.62	61.7	61.7	47.62
2	108,89	47.29	108.89	97.93	97.93	61.27	61.27	47.29
3	108,60	47.07	108.60	97.48	60.98	60.98	60.98	47.07
4	144,87	46.96	108.46	97.5	60.84	60.84	60.84	46.96
5	145,10	47.07	108.6	97.48	60.98	60.98	60.98	47.07
6	144,87	46.96	108.4	97.25	60.84	60.84	60.84	46.96
7	144,42	46.73	108.17	96.8	96.80	60.55	60.55	46.73
8	144,01	47.51	109.17	98.39	98.39	61.56	61.56	47.51
9	147.83	48.4	110.33	100.21	100.21	62.71	62.71	48.4
10	151,24	50.06	112.49	103.62	103.62	64.86	64.86	50.06
11	154,43	51.61	154.43	118.49	106.8	66.88	66.88	66.88
12	158,97	53.83	158.97	123.53	111.35	69.75	69.75	69.75
13	160,09	54.4	160.09	124.94	112.56	70.54	70.54	70.54
14	161,73	55.26	161.69	127.05	114.46	71.79	71.79	71.79
15	162.06	55.44	162.06	127.47	114.83	72.04	72.04	72.04
16	160.42	54.57	160.42	125.34	112.91	70.79	70.79	70.79
17	147.38	48.18	147.38	110.6	105.78	62.42	0	62.42
18	145.33	39.42	145.33	108.3	0	61.13	0	59.22
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	109.61	37.08	61.99	146.92	97.53	61.99	61.99	87.26
24	108.89	36.67	108.89	145.22	96.25	61.27	61.27	47.29
Consumo	2820.03	962.13	2513.68	2242.89	1811.7	1284.86	1161.32	1153.63

total								
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Luego al tener el consumo total diario para cada escenario utilizando un sistema de acumulación de agua fría lo comparamos con el consumo real de para cada escenario sin usar TES y determinamos el ahorro de energía. Tabla 3.7 (Anexo 12)

Tabla 3.7- Relación consumo- ahorro de energía

Escenarios	Consumo utilizando TES(kW/h)	Consumo sin utilizar TES(kW/h)	Ahorro (kW/h)
Carga máxima	2820.03	3182.3	362.27
Carga mínima	962.13	1113.71	151.58
Escenario 3	2513.68	2860.62	346.94
Escenario 3.1	2242.89	2337.71	94.82
Escenario 3.2	1811.7	2047.96	236.27
Escenario 4	1284.86	1423.96	139.1
Escenario 4.1	1161.32	1304	142.68
Escenario 4.2	1153.63	1265.97	112.34

Como se mostró con la siguiente tabla la implementación de un sistema de acumulación de agua fría trae consigo un ahorro energético bastante considerable

3.5- Eficiencia

Teniendo las cargas de las enfriadoras (el valor numérico es igual a la capacidad de las enfriadoras ya que estas trabajan a $plr=1$, estos valores se muestran en la tabla- 2.2) y el consumo diario a partir de la ecuación 2.12 obtenemos el COP de cada enfriadora durante cada hora como se muestra en el Anexo 13, luego determinamos el promedio para obtener el COP diario ante cada escenario Tabla 3.8

Tabla 3.8 – Valor del COP de cada enfriadora ante cada escenario de simulación.

	C.Máx	C.Mín	Esc-3	Esc - 3.1	Esc – 3.2	Esc - 4	Esc – 4.1	Esc – 4.2
COP	3.51	3.37	3.53	3.52	3.46	3.69	3.68	3.47

Una vez obtenido el COP diario del sistema ante cada escenario realizamos el promedio de los mismos obteniendo un COP de 3.53.

El tanque de almacenamiento a emplear está compuesto por tres capas; una de Aero inoxidable, con aislamiento de polietileno expandido y una pintura exterior de color blanco. La eficiencia de este tipo de tanque se encuentra en el rango de 0.9 a 0.95, por lo que tomando el valor máximo y mínimo de eficiencia para el tanque y multiplicándolo por el COP del sistema obtenemos la eficiencia del sistema que sería:

Eficiencia máxima---- 3.1777--- para el límite inferior del rango.

Eficiencia máxima-----3.35 ---- para el límite superior del rango.

3.6- Simulación dinámica.

El porqué de este modelo se fundamenta en la necesidad que existe de controlar rigurosamente el tanque de almacenamiento para ser precisos en la operación del tanque. Conocer la variación de la temperatura del agua almacenada implica maniobrar correctamente el flujo volumétrico y así controlar el tiempo de carga, almacenamiento y descarga del sistema, los tres estados esenciales para operar el sistema lo más eficiente posible. Además sería muy ventajoso operar el sistema apoyándonos en el modelo de predicción de la carga térmica con el objetivo de almacenar con exactitud la energía necesaria que va ser utilizada en horas posteriores. Para esto se hace imprescindible el comportamiento dinámico de la energía interna dentro del tanque: Por tanto se definirá el esquema de análisis como sigue en la figura 3.2.

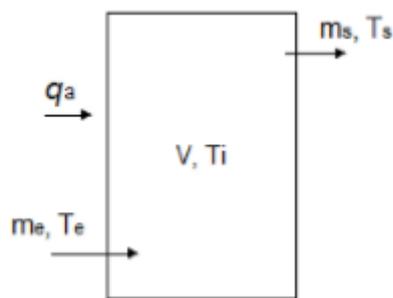


Fig. 3.2- Esquema de análisis del tanque de almacenamiento.

Donde q_a representa el calor absorbido desde el ambiente, m_e , T_e , m_s y T_s cuantifican el flujo y la temperatura del agua a la entrada y salida respectivamente. V y T_i son las propiedades - volumen y temperatura - que caracterizan la energía interna del tanque. Se toman en cuenta, tres estados de actividad, figura 3.10. Se asume que la temperatura es constante en el interior $T_i=T_s$, se desprecia el fenómeno de la termoclina, o sea no se considera el tanque estratificado.

En la siguiente figura se muestra un esquema funcional de la instalación

Donde:

- \dot{m} - flujo másico de agua
- t_1 - temperatura con la que sale el agua del chiller.
- t_2 - temperatura con la que sale el agua luego de ser utilizada en el hotel
- t_k - temperatura del agua en el interior del tanque
- t_{stk} - temperatura de salida del tanque

Primeramente se hacen varios supuestos:

1. El sistema es desacoplado, solo se analiza el circuito primario.
2. La temperatura de acumulación es de 7 °C
3. El flujo másico es igual a la suma del flujo de las tres enfriadoras al estar estas conectadas en paralelo
4. El calor del ambiente absorbido por el sistema se desprecia
5. El agua en el interior del tanque de almacenamiento podrá utilizarse simple que se cumpla la siguiente condición -- $Q_{\text{tanque}} \geq Q_{\text{demanda}}$.

El comportamiento del sistema se analizara cada 10 minutos durante todo el horario pico para tener así una idea más exacta de como varia la carga acumulada y la temperatura en el interior del tanque a través del tiempo.

Primero determinamos la temperatura de retorno del agua una vez que satisface la carga térmica del hotel (t_2), partiendo de que la temperatura de salida del agua del tanque es de 7 °C y mediante la ecuación donde despejamos la misma.

$$Q_{\text{demandada}} = 476.32 \quad \text{Ec.3.2}$$

$$\dot{m} * C_p * (t_2 - t_{stk}) = 476.32 \quad \text{Ec.3.3}$$

$$t_2 = 10.92 \text{ °C}$$

Luego se debe determinar la tasa de aumento de la temperatura del agua en el interior del tanque a medida que esta se utilice para suplir la demanda térmica en el hotel.

Partimos de la ecuación

$$Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sale}} = Q_{\text{acumulada}} \quad \text{Ec.3.4}$$

$$\dot{m} * C_p * t_2 - \dot{m} * C_p * t_{stk} = V_t * \rho * C_V * t_{SS} \quad \text{Ec.3.5}$$

Donde :

- $\dot{m} = \rho * V$
- ρ - densidad del agua $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
- V - volumen del líquido en el interior del tanque que se mueve durante la operación=volumen dl tanque / 3600= $0.065 \text{ m}^3/\text{s}$
- C_p - capacidad calorífica del agua = $4.18 \text{ KJ}/\text{kg}*\text{K}$
- C_V – capacidad volumétrica = $4.19 \text{ KJ}/\text{kg}*\text{K}$
- t_{SS} – aumento de la temperatura durante cada recorrido.

Despejando y calculando t_{SS} de la ecuación obtenemos que $t_{SS} = 0.00048$ que será la tasa de aumento de la temperatura una vez hecho el primer recorrido del agua fría por el hotel. Una vez obtenido este valor podemos determinar el comportamiento de la temperatura y la carga acumulada a través del tiempo, en este caso se evaluara en periodo de tiempo de 10 minutos durante todo el horario pico.(figura 3.3)

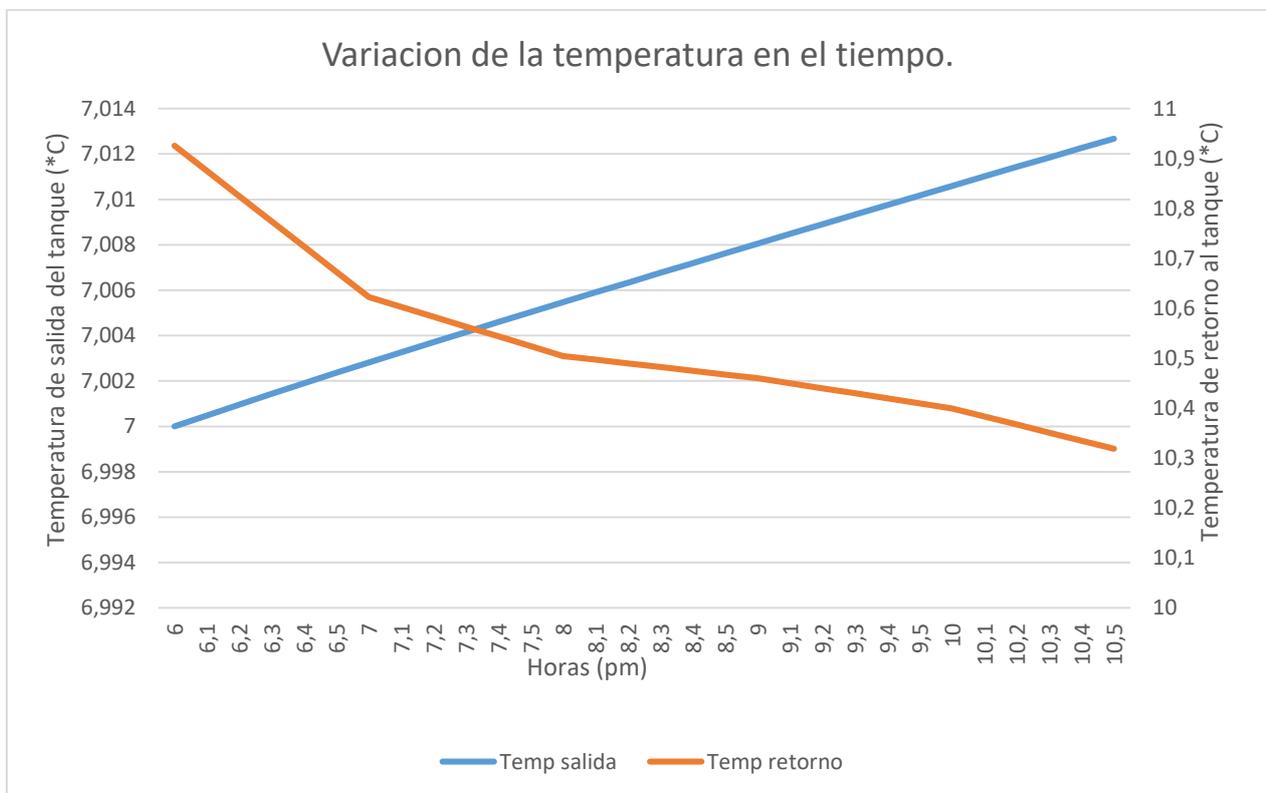


Fig.3.3- variación de la temperatura de salida y de retorno durante el horario pico.

Luego conociendo los valores de las temperaturas de salida y de retorno del agua en el sistema, calculamos mediante la ecuación 3.5 la energía almacenada en el interior del tanque de almacenamiento en cada periodo de tiempo, obteniendo como resultado la variación de la misma. (Fig. 3.4)

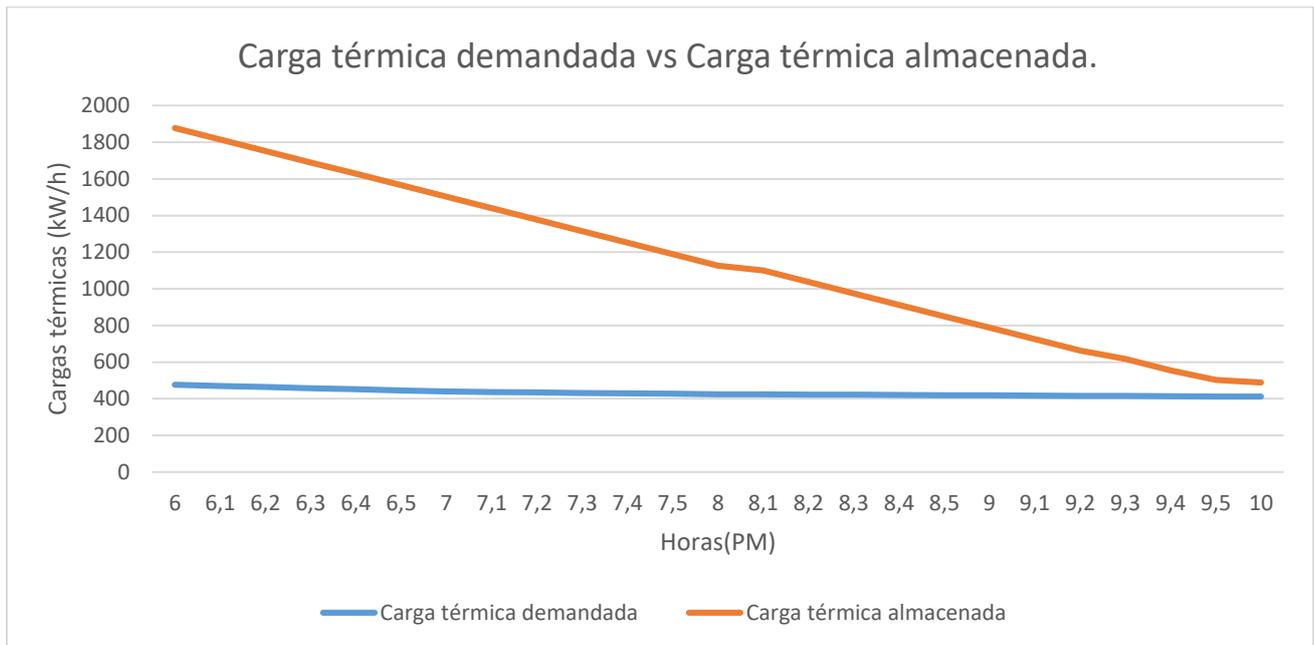


Fig. 3.4- Comportamiento de la carga térmica acumulada.

Ya que se cumple que la Q almacenada (tanque) $\geq Q$ demanda durante todo el horario pico se demuestra que es posible la implementación de un sistema de acumulación térmica en una instalación hotelera con las características expuestas en el siguiente trabajo de diploma.

3.7- Análisis de factibilidad económica.

Uno de los objetivos de este trabajo es el estudio de factibilidad económica del empleo de la técnica de acumulación de frío en el caso de estudio presentado.

Para determinar la conveniencia económica de cualquier inversión existen varios métodos, de los cuales el más básico es el período de recuperación simple el cual emplearemos en este estudio.

3.7.1- Período de Recuperación Simple de Inversión.

El período de recuperación simple no es que la relación de entre la inversión de capital y los ahorros anuales:

Recuperación simple de inversión (años) = inversión de capital / ahorros anuales

A medida que el período de recuperación sea más corto es más factible ya que esto supone una mayor conveniencia económica. La mayoría de las empresas requieren que sus inversiones tengan períodos de recuperación simple de menos de tres años.

Debido a todo esto es necesario valorar el ahorro anual que representa el empleo de las técnicas de acumulación de frío en el consumo energético. (Cabrera, 2012)

3.7.2- Estimación del costo de inversión.

Para satisfacer la demanda energética se utilizan dos tanques de almacenamiento de aproximadamente 117 m³ cada uno, conformados de acero inoxidable con recubrimiento de polietileno expandido y pintados de blanco cuyo precio en el mercado internacional ronda los 20 000 CUC cada tanque, por lo que el costo de inversión para la utilización de un sistema TES (teniendo en cuenta solo los tanques) es de \$ 40 000.

3.7.3-Determinación del ahorro en dinero diario.

Para determinar el ahorro diario en función de dinero que representa la utilización de un TES con respecto a una instalación normal de varias enfriadoras para los mismos casos de estudio debemos tener en cuenta los diferentes horarios de la tarifa eléctrica (horario pico, de madrugada y diurno) y la cantidad de energía consumida por el sistema en los mismos.

Tarifa eléctrica para instalaciones turísticas:

- \$ 0.17 por kW consumido en el horario pico (18:00-22:00 h)
- \$0.095 por kW consumido en horario del día (6:00-18:00 h)
- \$0.06 por kW consumido en horario de madrugada (22:00-6:00 h)

Tabla 3.8 - Análisis de costo y consumo para cada escenario sin la utilización de un TES

Escenarios	Consumo por horarios (KW/h)			Costo por horarios(\$)			Costo Total (\$)
	Diurno	Madrugada	Pico	Diurno	Madrugada	Pico	
Carga máx.	946,81	1 684,79	550,70	56,81	160,06	93,62	310,48
Carga mín.	264,27	629,54	219,90	15,86	59,81	37,38	113,05
3	786,76	1 533,56	540,30	47,21	145,69	91,85	284,74
3.1	679,52	1 246,24	411,95	40,77	118,39	70,03	229,19
3.2	554,70	1 110,39	382,87	33,28	105,49	65,09	203,86
4	323,68	813,45	286,84	19,42	77,28	48,76	145,46
4.1	303,54	731,55	268,92	18,21	69,50	45,72	133,43
4.2	300,81	716,03	249,14	18,05	68,02	42,35	128,42

Tabla 3.9 - Análisis de costo y consumo para cada escenario con la utilización de TES

Escenarios	Consumo por horarios (kW/h)			Costo por horarios(\$)			Costo Total (\$)
	Diurno	Madrugada	Pico	Diurno	Madrugada	Pico	
Carga máx.	980,12	1839,91	0,00	58,81	174,79	0,00	233,60
Carga mín.	356,71	605,42	0,00	21,40	57,52	0,00	78,92
3	823,16	1690,52	0,00	49,39	160,60	0,00	209,99
3.1	878,16	1364,74	0,00	52,69	129,65	0,00	182,34
3.2	633,97	1177,72	0,00	38,04	111,88	0,00	149,92
4	489,86	795,00	0,00	29,39	75,52	0,00	104,92
4.1	489,86	671,45	0,00	29,39	63,79	0,00	93,18
4.2	417,51	736,12	0,00	25,05	69,93	0,00	94,98

Tabla 3.10 - Ahorro de dinero total.

Escenarios	Costo total sin utilización de TES (\$)	Costo total con TES (\$)	Ahorro (\$)
Carga máx.	310,48	233,60	76,88
Carga mín.	113,05	78,92	34,13
3	284,74	209,99	74,76
3.1	229,19	182,34	46,86
3.2	203,86	149,92	53,94
4	145,46	104,92	40,54
4.1	133,43	93,18	40,25

4.2	128,42	94,98	33,44
------------	--------	-------	-------

Como se muestra en las tablas anteriores cuando se utiliza un sistema de acumulación de agua fría el ahorro en dinero para cada escenario es considerable y demuestra la factibilidad monetaria de implementar estos sistemas cumpliendo así uno de los objetivos trazados.

3.7.4- Determinación del ahorro anual.

Para determinar el ahorro anual primeramente multiplicamos el ahorro diario del sistema de acumulación térmica ante cada escenario de simulación y lo multiplicamos por los 365 días del año, luego hallamos un promedio de lo ahorrado anualmente y así determinamos el ahorro anual neto. Tabla 3.11

Tabla 3.11- Ahorro anual

Escenarios de simulación	Ahorro diario(\$)	Ahorro anual (* 365)	Promedio(\$)
Carga máx.	76,88	28 061,2	18 286,5
Carga min.	34,13	12 457,45	
3	74,76	27 287,4	
3.1	46,86	17 103,9	
3.2	53,94	19 688,1	
4	40,54	14 797,1	
4.1	40,25	14 691,25	
4.2	33,44	12 205,6	

El ahorro anual promedio con la utilización de un sistema de acumulación térmica en el caso de estudio anteriormente expuesto es de 18 286,5 CUC.

3.7.5-Recuperacion de la inversión.

Una vez obtenido el ahorro anual y conociendo el monto del capital de la inversión, podemos obtener el período de recuperación de la inversión.

Recuperación simple de inversión (años) = inversión de capital / ahorros anuales

$$RSI = 40\ 000 / 18\ 286,5$$

$$RSI = 2,18 \text{ años}$$

3.8-Conclusiones parciales

- El sistema de almacenamiento se dimensiono para almacenar 1859.51 kW/h de energía en 234 m^3 de volumen de agua fría en dos tanques de 117 m^3 cada uno.
- Con la estrategia de operación de carga completa se logró trasladar la carga demandada en el horario pico hacia los horarios diurnos y de madrugada donde la tarifa eléctrica es más económica.
- Se demostró que la implantación de un sistema TES de agua fría permite un ahorro significativo tanto de energía consumida como de dinero con respecto al mismo escenario de estudio pero sin utilizar estos sistemas, ahorrando anualmente aproximadamente 18 286,5 CUC anuales recuperando así la inversión en 2.18 años.

Conclusiones generales.

- Los sistemas de acumulación térmica son utilizados en las instalaciones de refrigeración o de climatización para disminuir la demanda de energía eléctrica, la capacidad frigorífica a instalar y los costos operacionales.
- El empleo de estos sistemas trae varios beneficios económicos pues favorecen el ahorro de energía eléctrica. También representan la utilización de energía limpia ya que minimizan los daños ambientales al disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmosfera y reducir la utilización de combustibles fósiles.
- Existen varias estrategias de operación para el almacenamiento de energía (completa o parcial), una correcta selección de estas estrategias trae consigo importantes ahorros a la hora de acumular frío.
- Se dimensiono un sistema de almacenamiento con una capacidad de $234 m^3$ diseñado para almacenar 1859.51 kW/h de energía, utilizando una estrategia de almacenamiento completo que permita trasladar la carga demandada en el horario pico hacia otros más económicos.
- Mediante un breve estudio económico se demostró que es factible la utilización de un sistema de almacenamiento siguiendo la estrategia de almacenamiento completo pues se logró un ahorro monetario diario que va desde \$30-80 diarios y que es de aproximadamente 18 286,5 CUC anuales, con respecto a un sistema de climatización que no utilice el almacenamiento de energía.

Recomendaciones.

1. Perfeccionar los modelos matemáticos que describen el funcionamiento del tanque de almacenamiento para la obtención de resultados más exactos y realizar un diseño más exacto del sistema de almacenamiento en general. Preferiblemente utilizando el software TRANSYS para la simulación dinámica.
2. Profundizar en el estudio de otras variantes tecnológicas de acumulación energética utilizada en la hotelería como son; los sistemas de calor latente, con el objetivo de reducir el consumo energético.

Bibliografía

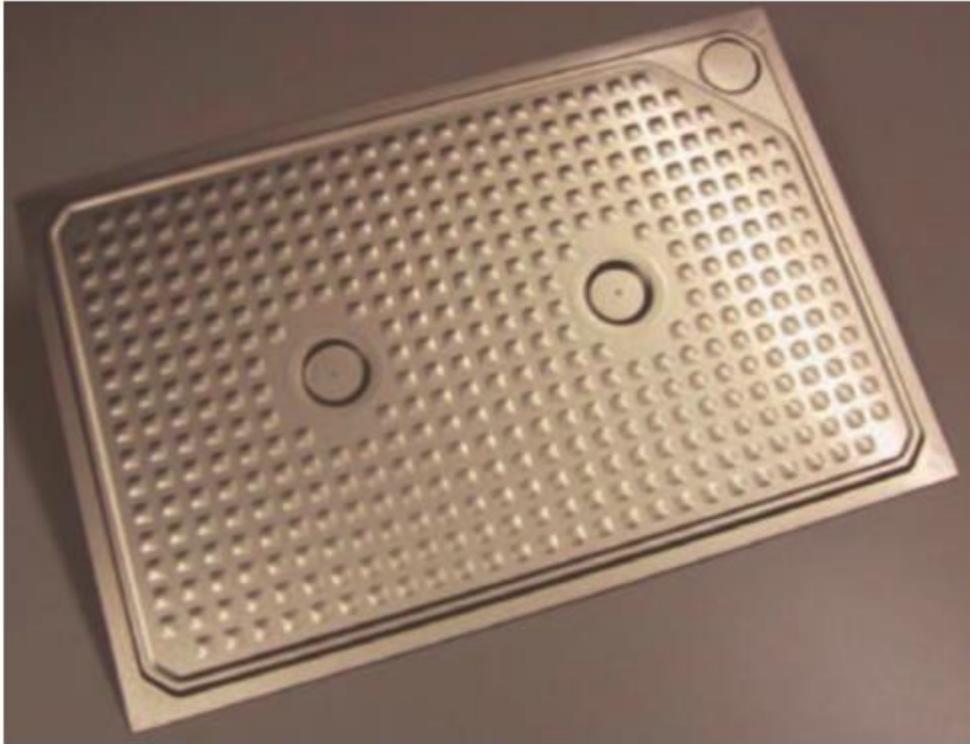
- A.Wagas. (2011). Thermal performance of latente heat storage for free cooling of building in a dry and hot climate . *Energy and building*,pp. 2621-2630.
- Álamo, Y. R. (2007). *Estudio de factibilidad de la utilización de técnicas de acumulación de frío en instalaciones turísticas*. Cienfuegos: CEEMA.
- Álamo, Y. R. (2007). *Estudio de factibilidad de la utilización de técnicas de acumulación de frío en instalaciones turísticas*. (Tesis de Grado): Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". Cienfuegos, Cuba.
- Asensi, O. L., Carlos, P. S., & Joaquim, R. S. (2012). *Sistema de almacenamiento de energía térmica combinando material sólido de calor sensible y material de cambio de fase*. Universidad Politecnica de Cataluña, España.
- ASHRAE. (2007, mayo 24). *Desing Guide for Cool Thermal Storage*. Retrieved from http://www.pnm.com/customers/thech_guides/PDF/P_PA_28.pdf
- Cabrera, D. A. (2012). *Almacenamiento térmico en aplicaciones solares de concentración de alta temperatura*. Sevilla: Universidad de Sevilla, España.
- Dincer, I. (2001). On thermal energy storage systems and applications in building. *Energy and building*, pp.377-388.
- E.Onoó. (2012). Thermal energy storage implementation using PCM for solar cooling and refrigeration application. *Energy procedia*,pp. 947-956.
- H.Lin. (2014). Study on chilled energy storage of airconditioning sustem whith energy saving. *Energy and building*,pp. 41-46.
- Harm, D. L. (2015). *Desarrollo de un sistema de almacenamiento térmico para la central termosolar astexol 2*. España.
- Hernández, D. M. (2010). *Estimación de cargas térmicas de climatización de hoteles mediante simulación y redes neuronales artificiales*. Cienfuegos, Cuba.
- Hidalgo, D. y. (2011). *Sistema de acumulación termica en la climaticzación*. Cienfuegos, Cuba.
- Homs, S. M. (2009). *Eficiencia energética de edificios residenciales*. Barcelona.
- I.Dincer. (2001). Energetic, enviromental and economic aspects of thermal energy storage systems for cooling capacity. *Applied thermal engenierring*,pp. 1105-1117.
- Incropera. (1999). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
- Jareño, M. J. (2012). *Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado*, Madrid.
- Karim, M. (2011). Experimental investigation of a stratified chilled-wather thermal storage system. *Applied Thermal Engieneering*.
- Liu, L. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energym applications . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,pp. 693-706.

- Lozano, M., Ramos, J., & Pino, P. d. (2005). *Optimización de sistemas de frío con acumulación*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, España.
- M.A.Ezan. (2010). Energetic and exergetic analysis and assessment of thermal energy storage unit for building applications. *Energy and building*, 1896-1901.
- Ma, F. B. (2010). *Model Predictive Control of Thermal Energy Storage in Building Cooling Systems*. Energy Procedia, pp.947-956.
- Ma, S. W. (2008). *An optimal control strategy for complex building central chilled waters systems for practical and real-time applications*. Building and Environmental, pp. 540-550.
- Massimo Fiorentini, P. C. (2015). Development and optimization of innovative HVAC system with integrated PVT and PCM thermal storage for a net-zero energy retrofitted house. *Energy and Building* ,pp. 21-32.
- Miranda, J. (2019). *La web de las energías renovables*. Retrieved from <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn188.html>
- Ochoa, M. A. (2017). *Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase en un secador solar tipo Hohenheim*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pacheco, M. V. (2010). *Estudio Energético del Sistema de Climatización del Hotel Jagua*. Cinefuegos, Cuba.
- Pérez, M. E. (2012). *Análisis de estrategias para el almacenamiento de frío y su efecto en el comportamiento energético en los sistemas de climatización centralizados. Caso de estudio hotel Jagua*. Cienfuegos, Cuba : CEEMA.
- Pérez, M. E. (2012). *Análisis de estrategias para el almacenamiento de frío y su efecto en el comportamiento energético de los sistemas de climatización centralizados*. Cienfuegos, Cuba : CEEMA.
- Pérez, M. E. (2012). *Análisis de estrategias para el almacenamiento de frío y su efecto en el comportamiento energético de los sistemas de climatización centralizados. Caso de estudio hotel Jagua*. Cienfuegos, Cuba.
- Quadri, I. N. (2010). *Conceptos básicos para el ahorro energético en instalaciones de aire acondicionado*. CLIMA, pp.36-74.
- Rodado, J. M. (2013). *Material acumulador de energía térmica*. Recuperado de: <http://patentados.com>
- Ruiz, A. G. (2016). *Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía mediante cambio de fase, a media y alta temperatura*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- S.M.Homain. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies . *Energy Conver.Mgmt*, pp. 1127-1138.
- Sahir, D. H. (2013). *Optimization of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning(HVAC) System Configurations*. Taxila, Pakistan: University of Engineering & Technology.

- Sáiz, D. J. (1991, noviembre 24). Análisis sobre el almacenamiento térmico en la edificación, España.
- Schilpf, D. (2014). *Tecnología de Almacenamiento de CSP. Últimos desarrollos*. Bietingheim: Deutsche Gesellschaft.
- Schutz, T. (2015). A comparison of thermal energy storage model for building energy. *Energy and building*, 23-31.
- Tarrillo, J. M. (2012). *Sistema de almacenamiento de energía*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Torres, M. Y., Calvo, M. R., Justiz, M. S., DrC, M. Á., & Sarduy, D. G. (2019). *Selección óptima de una planta de enfriadoras para una instalación hotelera*. Cienfuegos, Cuba.
- V.V.Tyaqi. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and sustainable energy*, pp. 1146-1166.
- Varios. (2015). *Tanques térmicos y los principios de la transferencia de calor*. Recuperado de: sied.conalep.edu.mx.
- Vicente, R. D. (2014). *Estudio termodinámico del tanque de almacenamiento de sales en una central termosolar*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Zhou, J. (2005). Control Optimization for a Chilled Water Thermal Storage System Under a Complicated Time-of-Use Electricity Rate Shedule. *Energy and Building*.

Anexos

Anexo 1-Ejemplo de material de cambio de fase.



Anexo 2:- Características principales de las zonas térmicas

Área	Habitación tipo	total	Dimensiones (m x m x m)/ Orientación de la zona acristalada	Ganancias de calor Tipo/cantidad/potencia
Habitaciones edificio principal	planta alta (este)	3	9 x 4 x 3 (Norte)	(Ventilador,1,230)(Televisor,1,113) (Secador de pelo,1,1300) (Iluminación, 9,20); Capacidad máx. personas (3)
	planta alta (oeste)	3	9 x 4 x 3 (Norte)	
	planta alta (habitaciones intermedias)	9	9 x 4 x 3 (Norte)	
	planta baja (habitaciones intermedias)	18	9 x 4 x 3 (Norte)	
	planta baja (habitaciones intermedias esquina este-oeste)	12	9 x 4 x 3 (Norte)	
Habitaciones Cabañas	Esquina oeste	3	7.8 x 4.2 x 3.4 (sur)	
	Esquina este	3	7.8 x 4.2 x 3.4(sur)	
	habitaciones intermedias	36	7.8 x 4.2 x 3.4(sur)	
Áreas publicas	Restaurante	1	31.1 x 13.3 x 2.3 (sur)	(ventilador,2,1000); (refrigerador,1,300); (mesa fría,2,500); (mesa caliente,3,3900); (Extractor,1,100);(cafetera,1,280);(tostadora de pan,2,3200); (Computadora,2,100); Iluminacion,60,1581)(Capacidad máxima personas, 67
	Cabaret	1	14 x 19 x 5.5 (sur)	(ventilador,2,1000); (nevera,1,117.61); (extractor, 1,100); (baffles,4,1250); (computadora,1,100) ; (Iluminacion,35,2815); (capacidad máxima de personas, 500)
	Tiendas	2	7.8 x 4.2 x 3.4(Norte)	(Ventilador,3,200);(computadora,2,100);(iluminación,15,421); capacidad máxima de personas, 15)

Anexo 3- Cálculos de transferencia de calor

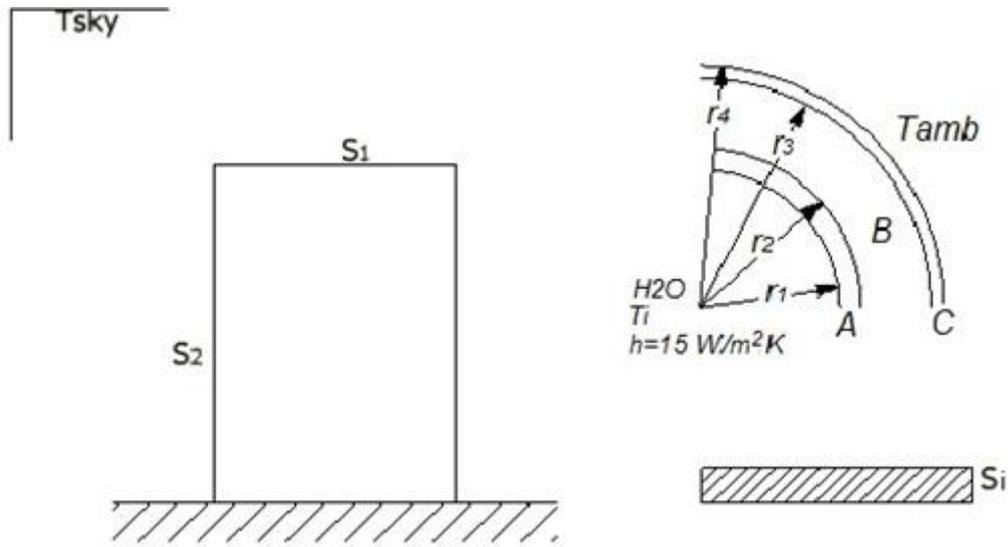


Figura anexo-Esquema de análisis del tanque de agua fría en el exterior.

En esta figura se representa el esquema de análisis para proceder con los cálculos de transferencia de calor del tanque de almacenamiento, este estará compuesto por tres capas de materiales. El cuerpo en el interior del tanque será de acero con una densidad $\delta = 7\,840\text{ kg/m}^3$, $C_p = 465\text{ J/kgK}$ y una conductividad térmica $k = 80\text{ W/mK}$.

El aislamiento será Polietileno expandido con una densidad $\delta = 55\text{ kg/m}^3$, $C_p = 1210\text{ J/kgK}$ y $k = 0.027\text{ W/mK}$. Las propiedades ópticas de la superficie exterior están en función de una pintura de color blanco con substrato metálico, donde $\alpha = 0.21$ y $\varepsilon = 0.96$. (Incropera)

La ganancia de calor para la superficie S1 se define como.

$$q_1 = U_1 * A_2 * \Delta T = \frac{(T_{s,1} - T_{i,t})}{R_{Total,1}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde:

$T_{s,1}$ Es la temperatura exterior de la superficie superior del tanque y se determina como:

$$T_{s,1} = T_{amb} + \left[\frac{\alpha s * I_s - \varepsilon * \Delta R}{0.22} \right]^{\frac{3}{4}} \quad \text{Ec. 3.7}$$

$T_{i,t}$ - representa la temperatura del agua fría en el interior del tanque.

α = absorptividad de la superficie.

I_s = radiación solar total incidente en la superficie, Btu/(h·ft²).

ε = emitancia de la superficie.

A = Área de cada elemento estructural ft².

$\Delta R = 20$ (Btu/h·ft²). Diferencia entre la radiación de onda larga incidente procedente de la bóveda celeste y la periferia, y la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura del aire exterior.

$R_{Total,1}$ Es la representación de las resistencias de cada uno de los materiales que componen la tapa (pared plana) del tanque.

$$R_{Total,1} = \frac{1}{h \cdot A} + \frac{L_A}{k_A \cdot A_A} + \frac{L_B}{k_B \cdot A_B} + \frac{L_C}{k_C \cdot A_C} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Donde:

$h = 15$ W/m²k Representa el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua estancada dentro del tanque.

$k_A = 80$ W/mk, conductividad térmica de acero.

$k_B = 0.027$ W/mk, conductividad térmica del aislamiento térmico.

$k_C = 80$ W/mK, conductividad térmica del recubrimiento exterior del tanque, se supuso que fuese aproximadamente igual al del tanque.

$L_A = 0.02$ m; $L_B = 0.5$ m; $L_C = 0.005$ m; representan los espesores del tanque, del aislante y del recubrimiento respectivamente.

La ganancia de calor a través de la superficie S_2 se determina de la misma forma:

$$q_2 = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T = \frac{(T_{s,2} - T_{i,t})}{R_{Total,2}} \quad \text{Ec.3.9}$$

Donde:

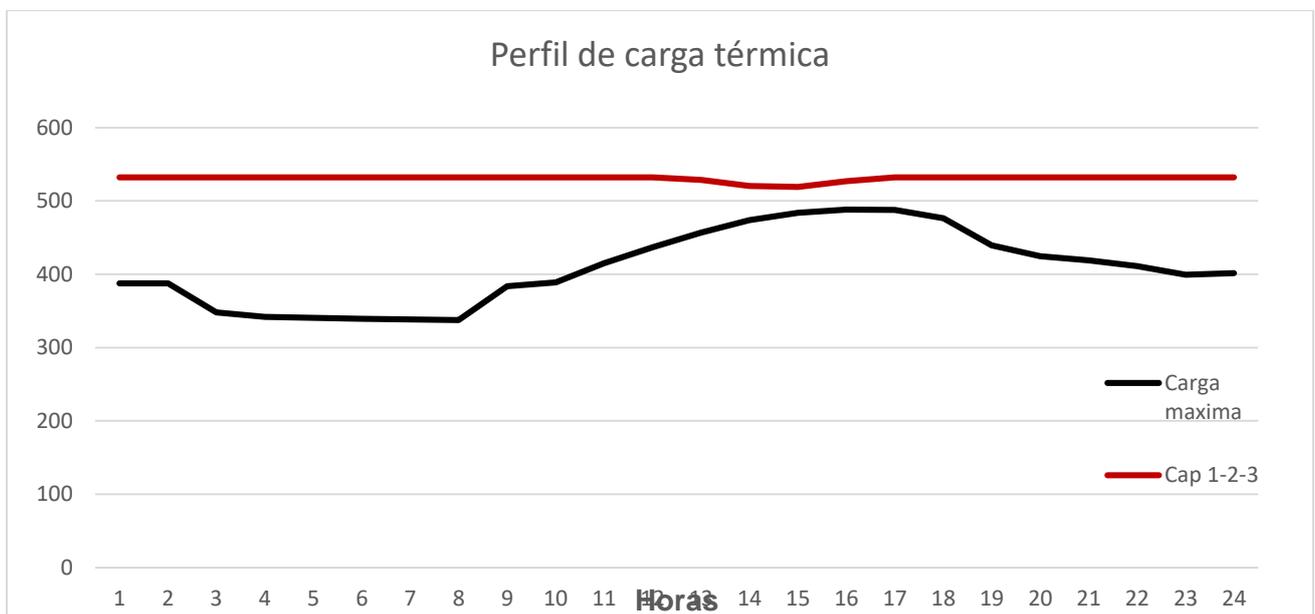
$$T_{s,2} = T_{amb} + \left[\frac{\alpha s \cdot I_s}{0.22} \right]^{\frac{3}{4}}; \text{ temperatura exterior de la superficie del cuerpo del tanque.}$$

$$R_{Total,2} = \frac{1}{h \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_B \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot L};$$
 resistencia térmica del cuerpo cilíndrico del tanque.

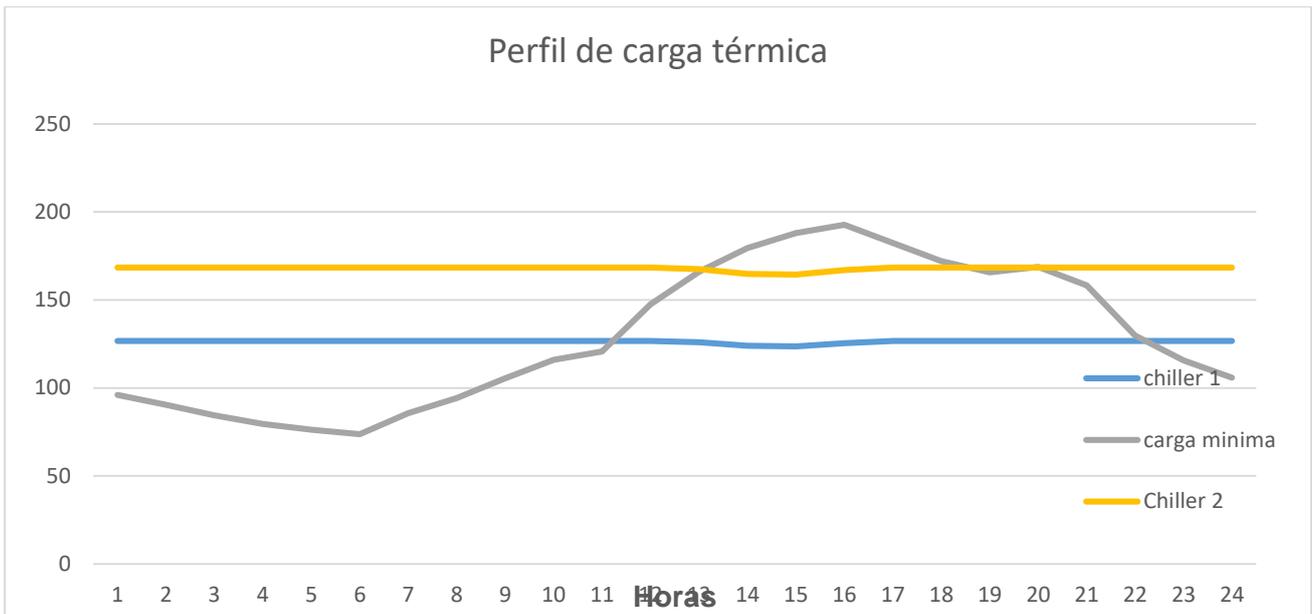
L = altura del tanque.

r_1, r_2, r_3, r_4 ; radios que describen las características físicas del tanque. (Pérez, 2012)

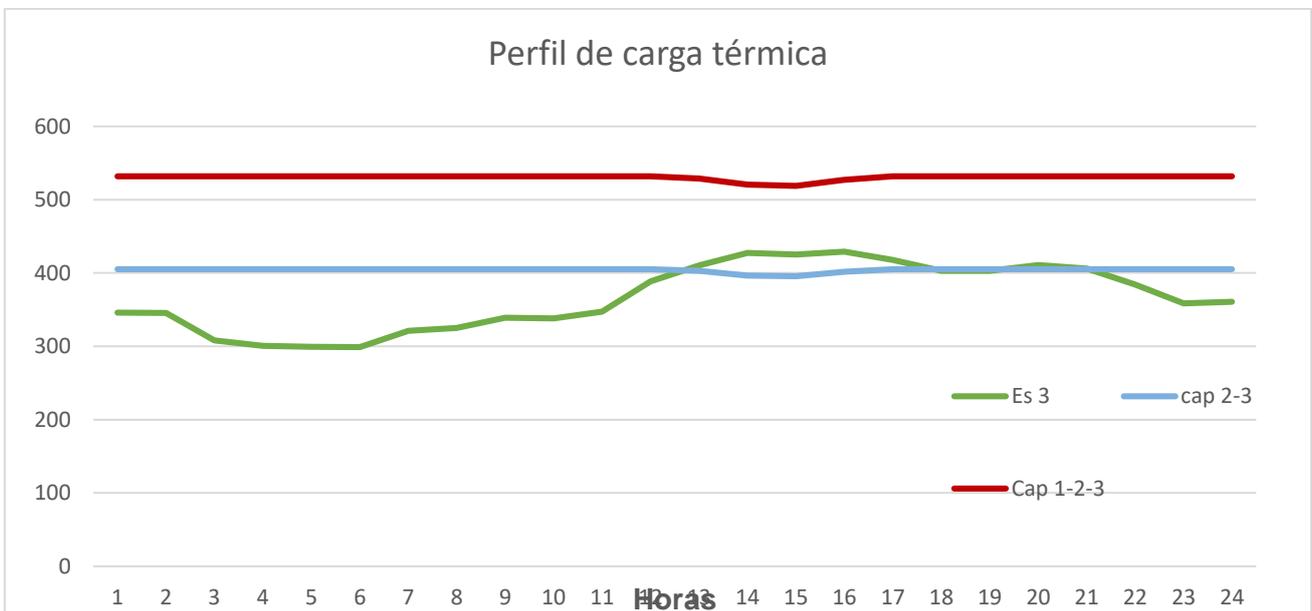
Anexo 4-Perfil de carga térmica para para el escenario de carga máxima.



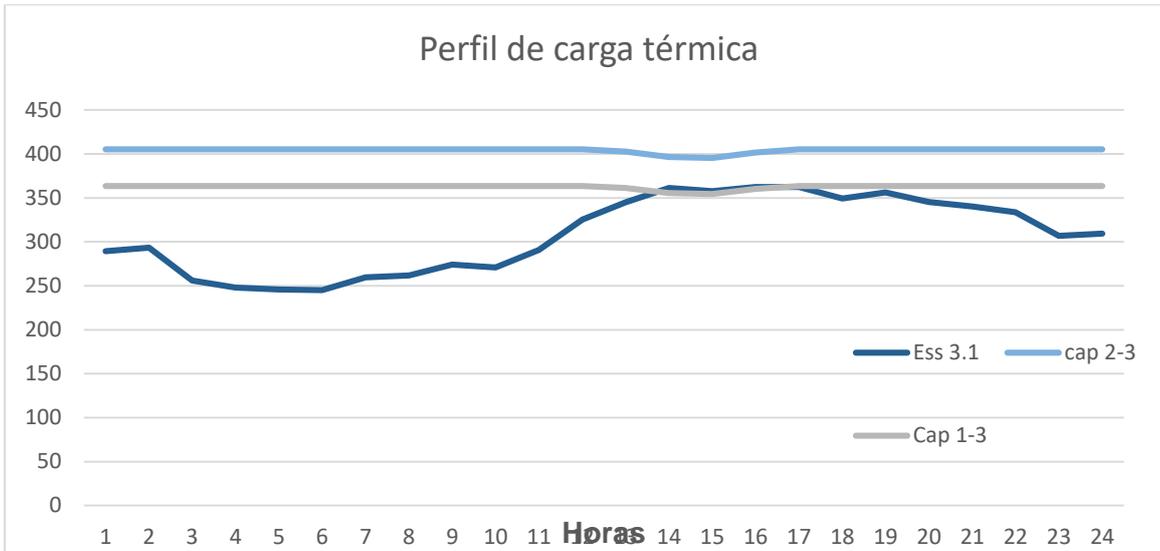
Anexo 5- Perfil de carga térmica para para el escenario de carga mínima.



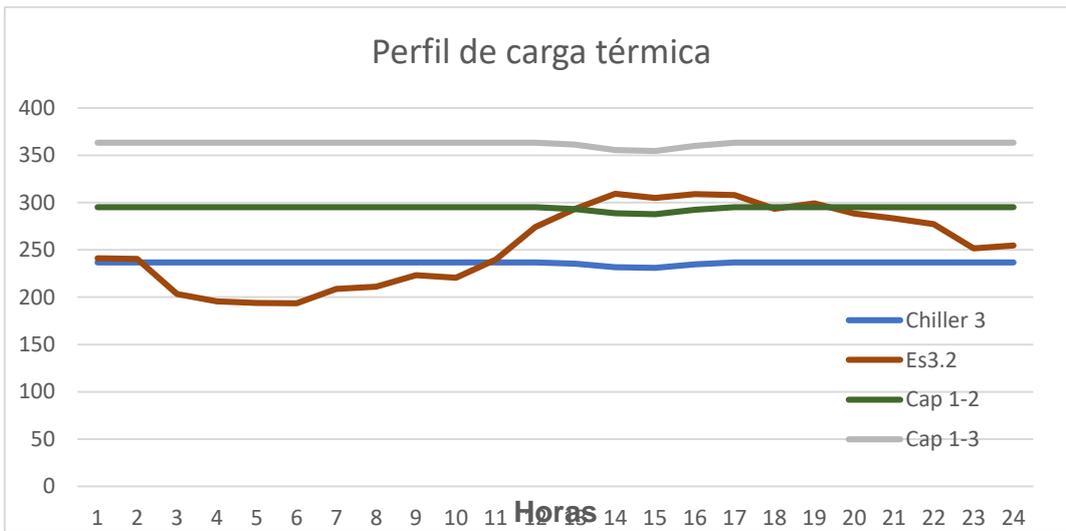
Anexo 6- Perfil de carga térmica para para el escenario 3.



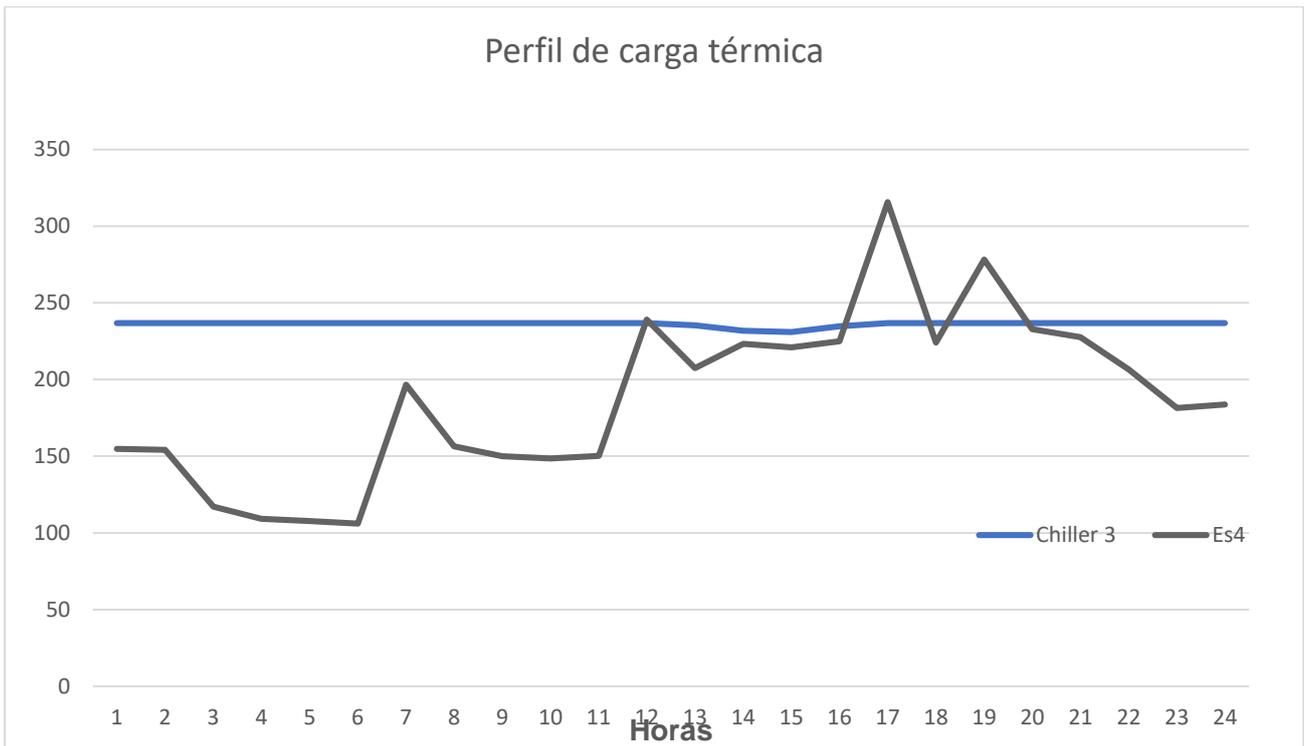
Anexo 7- Perfil de carga térmica para para el escenario 3.1



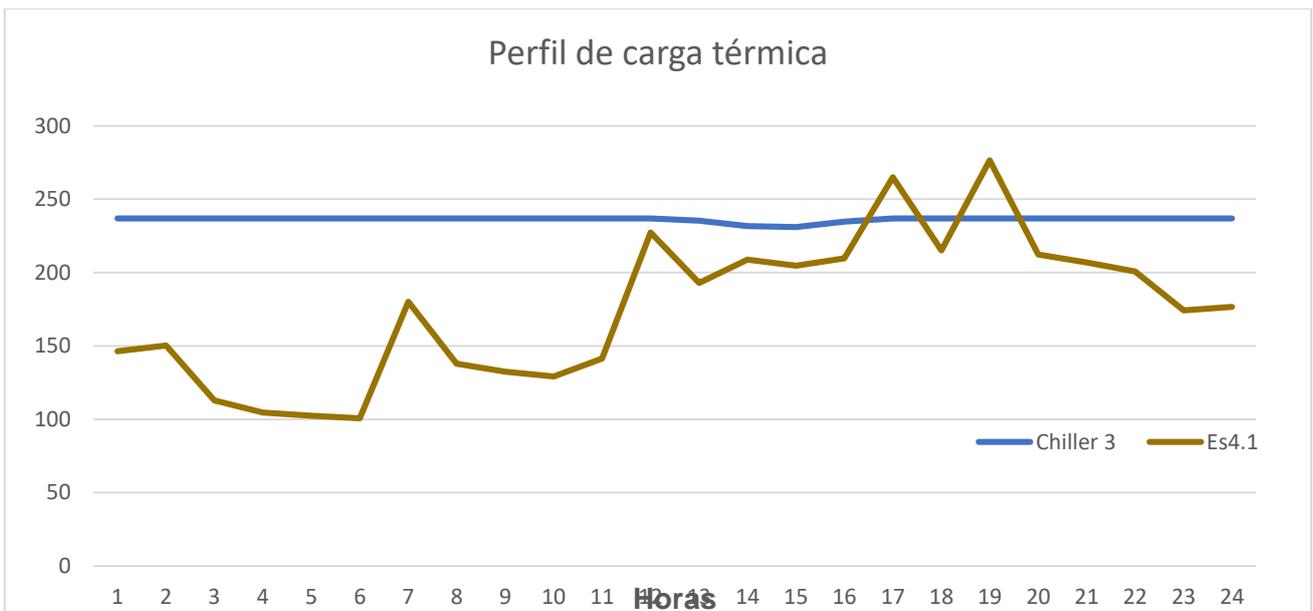
Anexo 8- Perfil de carga térmica para para el escenario 3.2



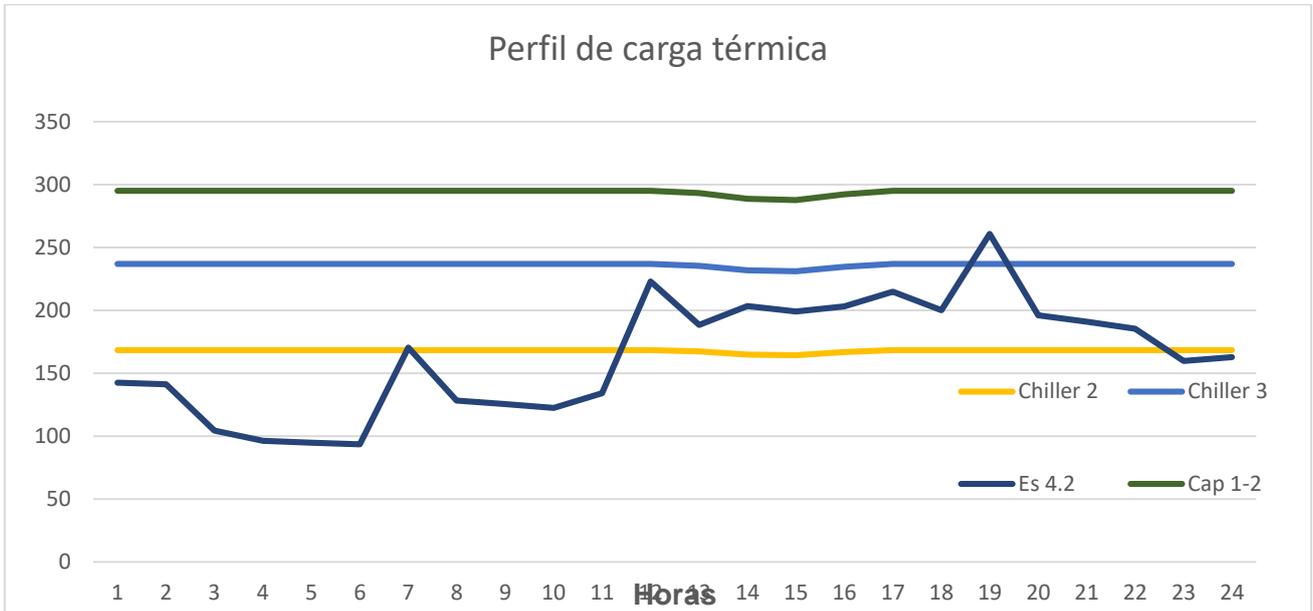
Anexo 9- Perfil de carga térmica para para el escenario 4



Anexo 10- Perfil de carga térmica para para el escenario 4.1



Anexo 11- Perfil de carga térmica para para el escenario 4.2



Anexo 12- Consumo real del sistema ante cada escenario sin la utilización de un sistema de acumulación térmica.

	horario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Consumo real		
perfil 1	enfriadora 117	24,48	33,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,08	30,09	36,20	39,26	36,31	39,04	42,35	40,22	37,14	33,14	32,71	33,18	32,25	33,90	34,52	35,06			
	enfriadora 155	45,91	38,88	43,12	44,95	41,46	41,78	44,38	43,16	37,87	43,29	44,67	41,70	47,28	46,30	44,32	46,31	44,13	47,32	43,35	44,05	44,54	42,15	38,32	42,35			
	enfriadora 218	61,65	59,99	60,45	60,31	59,15	60,84	60,30	59,84	62,64	64,32	64,37	69,27	69,94	71,79	72,02	70,42	62,12	60,20	61,60	60,41	61,07	61,49	61,50	58,21	3182,30		
perfil 2	enfriadora 117	33,88	33,07	32,31	31,75	31,51	31,16	32,18	33,61	35,40	37,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,98	34,60	
	enfriadora 155	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,07	51,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,83	0,00	0,00	
	enfriadora 218	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	66,93	69,07	69,80	68,61	59,59	57,75	58,14	58,45	58,48	0,00	0,00	0,00	0,00	1113,71	
perfil 3	enfriadora 117	0,00	0,00	35,79	31,67	30,27	30,13	34,04	33,02	0,00	0,00	0,00	35,25	33,96	38,95	42,30	40,08	28,44	24,02	34,96	31,38	28,56	25,37	0,00	0,00			
	enfriadora 155	42,98	43,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,65	44,55	44,22	40,65	45,55	42,03	42,83	40,16	47,19	47,56	41,29	42,61	44,53	45,35	43,86	44,05			
	enfriadora 218	61,14	60,17	58,48	60,07	60,92	60,78	59,51	61,55	61,44	63,03	65,70	69,43	69,70	71,75	69,83	70,78	61,37	61,03	59,66	61,42	62,35	62,82	61,62	60,91	2860,62		
perfil 4	enfriadora 117	32,52	32,26	32,10	32,01	32,10	32,01	31,85	32,43	33,10	34,36	35,53	37,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,18	32,68	32,26		
	enfriadora 155	0,00	0,00	46,72	46,25	44,41	42,85	46,27	44,44	0,00	49,71	0,00	0,00	51,78	52,47	54,18	50,88	45,32	44,75	44,89	45,47	42,76	0,00	0,00	0,00			
	enfriadora 218	60,15	59,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,62	0,00	66,41	69,70	68,96	71,49	70,76	70,77	61,75	59,53	60,83	60,17	62,21	62,43	60,81	60,74	2337,71		
perfil 5	enfriadora 117	34,95	34,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,54	36,79	37,97	39,64	40,07	40,75	40,88	40,21	35,37	34,62	35,04	35,12	35,46	35,62	35,12	34,70			
	enfriadora 155	44,38	45,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,62	43,81	47,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,99	45,73		
	enfriadora 218	0,00	0,00	59,24	58,70	58,76	58,59	59,08	60,22	0,00	0,00	0,00	68,20	67,40	71,72	71,37	70,76	59,87	61,11	60,90	59,03	62,21	59,50	0,00	0,00	2047,96		
perfil 6	enfriadora 117	0,00	0,00	0,00	23,85	23,93	23,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,04	0,00	30,37	30,54	29,71	24,77	24,02	24,44	24,52	24,85	0,00	0,00	0,00			
	enfriadora 155	46,32	45,93	42,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,64	48,16	49,88	52,08	0,00	54,81	54,18	50,60	0,00	43,57	0,00	45,78	44,12	0,00	0,00	0,00			
	enfriadora 218	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	58,46	57,38	0,00	0,00	0,00	0,00	69,09	0,00	0,00	0,00	60,17	0,00	61,84	0,00	0,00	61,28	59,11	58,51	1423,96		
perfil 7	enfriadora 117			23,93	23,85	23,93	23,85						29,04					24,77		24,44								
	enfriadora 155	45,53	45,57							44,60	44,97	46,32	49,04	49,22					46,90									
	enfriadora 218							57,60							68,34	70,59	70,67	69,49		59,99	61,79	60,71	61,00	60,98	58,74	58,14	1304,00	
perfil 8	enfriadora 117			23,93	23,85	23,93	23,85						29,04							24,44								
	enfriadora 155	45,14	44,70							43,69	44,31	45,67	48,35	49,45						44,47								
	enfriadora 218							57,10							68,10	70,31	70,38	69,15	61,27	59,22		59,87	60,18	60,18	57,98	57,41	1265,97	

Anexo 13- COP de cada enfriadora durante cada hora diaria y ante cada escenario de simulación.

Escenarios	Enfriadoras	Horas																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Carga Máxima	1	0,00	0,00	0,00	3,48	3,47	3,48	3,49	3,44	3,38	3,27	3,17	3,04	2,99	2,90	2,89	2,98	3,39	3,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,52	3,49	3,48	3,52	3,54	3,54	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	3,54
	3	3,83	3,87	3,88	3,89	3,88	3,89	3,91	3,85	3,78	3,65	3,54	3,40	3,34	3,23	3,21	3,32	3,79	3,87	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	3,87
Carga Mínima	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,21	0,00	0,00	0,00	0,00	3,41	3,45
	2	3,54	3,56	3,58	3,59	3,58	3,59	3,60	3,55	3,48	3,36	3,26	3,13	3,08	2,98	2,96	3,06	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escenario 3	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,17	3,04	2,99	2,90	2,89	2,98	3,39	3,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,52	3,49	3,48	3,52	3,54	3,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54
	3	3,84	3,87	3,88	3,89	3,88	3,88	3,91	3,85	3,78	3,65	3,54	3,40	3,34	3,22	3,21	3,32	3,79	3,87	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	3,87
Escenario 3.1	1	3,43	3,45	3,47	3,48	3,47	3,48	3,49	3,44	3,38	3,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,26	3,13	3,08	2,98	2,96	3,06	3,50	3,57	0,00	0,00	0,00	0,00	3,52	3,56
	3	3,84	3,87	3,88	3,89	3,88	3,89	3,91	3,85	3,78	3,65	3,54	3,38	3,34	3,23	3,21	3,31	3,79	3,87	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	3,87
Escenario 3.2	1	3,43	3,45	0,00	0,00	0,00	0,00	3,49	3,44	3,38	3,27	3,17	3,04	2,99	2,90	2,89	2,98	2,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,52	3,56
	3	3,84	3,87	3,88	3,89	3,88	3,89	3,91	3,85	3,78	3,65	3,54	3,40	3,34	3,23	3,21	3,31	3,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escenario 4	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	3,84	3,87	3,88	3,89	3,88	3,89	3,91	3,85	3,78	3,65	3,54	3,40	3,34	3,23	3,21	3,32	3,79	3,87	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	3,87
Escenario 4.1	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	3,84	3,87	3,88	3,89	3,88	3,89	3,91	3,85	3,78	3,65	3,54	3,40	3,34	3,23	3,21	3,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	3,87
Escenario 4.2	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,21	0,00
	2	3,54	3,56	3,58	3,59	3,58	3,59	3,60	3,55	3,48	3,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,52	3,56
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	3,40	3,34	3,23	3,21	3,32	3,79	3,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00