

TERCER CONGRESO INTERNACIONAL DE DISTRITOS TÉRMICOS

Una alternativa ambiental y de desarrollo sostenible



MEMORIAS 2021

MEMORIAS TERCER CONGRESO INTERNACIONAL DE DISTRITOS TÉRMICOS

Una alternativa ambiental y de desarrollo sostenible

Recopilación de Memorias de congreso
ACAIRE
Edición digital
ISSN: 2805-8755 (En línea)
Edición 01/2021

Publicación de:



Con el apoyo del proyecto Distritos Térmicos en
Colombia- Fase 2



Edición y diagramación:
MSc. Ing. Carolina Hernández.

Las opiniones expresadas en esta publicación no necesariamente reflejan el pensamiento de ACAIRE y son responsabilidad exclusiva de quien las emita y/o de sus actores. Se autoriza la reproducción total o parcial de esta publicación para fines educativos u otros fines no comerciales, siempre y cuando se cite la fuente.

Importante: En cumplimiento con la ley 1581 de 2012, queremos comunicarle que la Asociación Colombiana de Acondicionamiento del Aire y de la Refrigeración ACAIRE, está comprometida con la protección de datos.

Asociación Colombiana de Acondicionamiento del Aire
y de la Refrigeración, ACAIRE
www.acaire.org
Calle 70 # 12-77, Bogotá, D.C, Colombia
Código postal: 110231
Tel: 57-1-8053139/40

COMITÉ ORGANIZADOR

Rita Cristina Jaramillo
Directora CIDARE
ACAIRE

Bolívar Monroy
Director Técnico
ACAIRE

Angélica Antolínez
Consultora componente sostenibilidad del conocimiento del
Proyecto Distritos Térmicos Colombia
ONUUDI

Juanita Mendoza
Especialista en comunicaciones
Proyecto Distritos Térmicos Colombia
ONUUDI

Jordy López
Coordinador Técnico CIDARE
ACAIRE

Maira Alejandra Villamizar
Coordinadora de comunicaciones CIDARE
ACAIRE

COMITÉ CIENTÍFICO

Angélica Antolínez Esquivel

Ingeniera Química, candidata a Magíster en Ingeniería Ambiental.
Consultora del componente de sostenibilidad del conocimiento del proyecto Distritos Térmicos Colombia ONUDI

Camilo Arias Henao

Ingeniero Mecánico, Especialista en Eficiencia Energética en la Edificación: CTE, M.Sc. en Ingeniería Mecánica y Ph.D. en Ingeniería Energética.
Docente tiempo completo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Giovanni Barletta Manjarrés

Ingeniero Mecánico, Magister en Negocios (MBA), y Especialista en Gerencia de Empresas
Technical Manager
Emerson Climate Technologies

Lesme Corredor Martínez

Ingeniero Mecánico, Ph.D. en Ingeniería Mecánica
Docente tiempo completo
Universidad del Norte

Gustavo Guzmán Reyes

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Docente tiempo completo
Universidad Autónoma del Caribe

Rita Cristina Jaramillo Ceballos

Ingeniera Mecánica, M.Sc., Ph.D. en Ingeniería Mecánica
Directora CIDARE-CCDT
ACAIRE

Carolina Mira Hernández

Ingeniera Mecánica, M.Sc., Ph.D. en Ingeniería Mecánica
Investigadora Postdoc
Universidad Pontificia Bolivariana

Santiago Arango Aramburo

Ingeniero Civil, M.Sc. en ingeniería, Ph.D. en Dinámica de Sistemas y Posdoctorado en Modelación Energética
Docente tiempo completo
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Milén Balbis Morejón

Ingeniera Mecánica, M.Sc. en Eficiencia Energética y Candidata a Doctora en Ingeniería.
Profesor Tiempo Completo y líder del Grupo de Investigación en Automatización Energética GIOOPEN
Universidad de la Costa

Antonio José Bula Silvera

Ingeniero Mecánico, M.Sc., Ph.D. en Ingeniería Mecánica
Docente tiempo completo
Universidad del Norte

Blanca L. Foliaco Romero

Ingeniera Mecánica, Ph.D.C. en Ingeniería Mecánica
Universidad del Norte

César Isaza Roldán

Ingeniero Mecánico, Ph.D. en Ingeniería Mecánica
Profesor Investigador
Universidad Pontificia Bolivariana

Cristina Mariaca Orozco

Ingeniera mecánica, Master en Energía y Desarrollo
Coordinadora Técnica Nacional del Proyecto Distritos Térmicos Colombia
ONUUDI

Giovanni Andrés Pabón Restrepo

Ingeniero Mecánico, M.Sc. en Energías Renovables
Country Manager
Notus Energy

Omar Fredy Prías Caicedo

Ingeniero Eléctrico, Especialista en Gerencia de Tecnología, Máster en Eficiencia Energética.
Director Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética RECIEE
Universidad Nacional de Colombia

Marley Vanegas Chamorro

Ingeniera Química, M.Sc. en Ingeniería Química, Ph.D en Tecnología, Diversificación y Ahorro Energético
Coordinadora de Maestría en Gestión Energética
Universidad del Atlántico

Iván Tovar Ospino

Ingeniero mecánico, M.Sc. en tecnologías de climatización y eficiencia energética en edificaciones, Ph.D. en climatización
Docente tiempo completo
Universidad Autónoma del Caribe

Zulamita Zapata Benabithé

Ingeniera química, M.Sc. en Sistemas Energéticos, Ph.D. en ingeniería.
Miembro del Grupo de Energía
Universidad Pontificia Bolivariana

CONTENIDO

	Pág.
MEMORIAS TERCER CONGRESO INTERNACIONAL DE DISTRITOS TÉRMICOS	2
Estrategias de diseño arquitectónico de bajo impacto ambiental como aporte a la eficiencia energética en el clima cálido húmedo	8
Diseño de soluciones de climatización en proyectos residenciales multifamiliares, conectados a distritos térmicos.	19
Mejora de un modelo de caja gris para performance y consumo de chillers centrífugos en plantas de agua fría	32
Distrito Térmico Centro Empresarial y de Negocios Potenza	41
Análisis Transitorio de un Distrito Térmico, Caso de Estudio La Babilla del Malecón	50
Ingeniería conceptual de un distrito de Enfriamiento en la zona metropolitana de Bucaramanga	64
Dimensionamiento, viabilidad y optimización energética de los distritos térmicos de enfriamiento a partir del comportamiento de la demanda e implementación del tanque de almacenamiento de energía térmica	73
Propuesta de un distrito térmico como centro para el desarrollo sostenible del norte de Buga	84
Análisis termodinámico y comparación de un CRS convencional y un CRS con tanque flash en el LTC operado con pares de refrigerantes de bajo GWP	91
Almacenamiento Térmico de Energía por Medio de Hielo para Sistemas de Aire Acondicionado	102
Viabilidad de usar energía solar en distritos de enfriamiento en las seis regiones de Colombia	109
Distritos térmicos: un motor para el desarrollo y fortalecimiento de la calidad de vida en ciudades sostenibles	119

PRESENTACIÓN

El uso de energía para acondicionamiento de aire es el que ha sufrido un mayor incremento en las edificaciones, tanto en países desarrollados como en aquellos con economías emergentes. El uso final de energía para aire acondicionado en edificios residenciales y comerciales a nivel mundial se triplicó entre 1990 y 2016, alcanzando 2020 Tera vatios hora (TWh)¹, y se proyecta que se triplique nuevamente para el 2050². En Colombia, de acuerdo con el censo del DANE de 2018³, el 75.5% de la población vive en centros urbanos, y el 70% de estos centros urbanos se encuentran en zonas climáticas que ameritan la instalación de sistemas de aire acondicionado⁴. En este contexto, los distritos térmicos se perfilan como una solución de climatización sostenible para las ciudades, que aumenta la eficiencia energética, el confort y los ahorros económicos para los usuarios, disminuyendo los efectos nocivos sobre la capa de ozono y la emisión de gases de efecto invernadero.



Colombia es el país pionero en la implementación de distritos térmicos en Latinoamérica. El desarrollo de estas infraestructuras ha sido impulsado por el Proyecto Distritos Térmicos en Colombia, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la Unidad Técnica Ozono - UTO y la Dirección de Cambio Climático y Gestión del Riesgo, el Ministerio de Minas y Energía y la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME. Este proyecto es implementado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial - ONUDI, con el apoyo económico de la Oficina de Cooperación Económica y Desarrollo – SECO, de la Embajada de Suiza en Colombia.

En el marco del proyecto Distritos Térmicos en Colombia, se realizó el Tercer Congreso Internacional de Distritos Térmicos: Una alternativa ambiental y de desarrollo sostenible, de manera virtual del 17 al 19 de noviembre de 2021 organizado con el apoyo de la Asociación Colombiana de la Refrigeración y el Acondicionamiento de Aire – ACAIRE y su Centro de Investigación y Desarrollo de Acondicionamiento de Aire y Refrigeración -CIDARE.

1 International Energy Agency. The future of cooling: opportunities for energy – efficient air conditioning, 2018, p. 23. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>

2 *Ibíd.* p. 61

3 El Tiempo. Colombia, un país urbano que está envejeciendo. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/datos/principales-resultados-del-censo-de-2018-en-colombia-560234>

4 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Distritos Térmicos: Guía Metodológica. Colombia, 2020, p. 22. Disponible en: <https://www.distritoenergetico.com/distritos-termicos-guia-metodologica/>

Este fue un evento de alcance global, que reunió a expertos nacionales e internacionales de la industria y la academia, así como a representantes del gobierno colombiano, en torno a los distritos térmicos como estrategia para mitigar el impacto ambiental y construir ciudades sostenibles.



Esta publicación recoge los artículos presentados por la comunidad académica y profesional interesada en el conocimiento, desarrollo e implementación de distritos térmicos en la jornada de ponencias del Tercer Congreso Internacional de Distritos Térmicos: una alternativa ambiental y de desarrollo sostenible, que se desarrolló el 18 de noviembre de 2021

Estrategias de diseño arquitectónico de bajo impacto ambiental como aporte a la eficiencia energética en el clima cálido húmedo

Andrea Niampira Daza^{1*}; José David Puche Berroca²; Gloria Urrea Ceferino³

¹york.niampira@upb.edu.co; ²jose.puche@upb.edu.co; ³gloria.urrea@upb.edu.co

RESUMEN

El presente artículo se centra en el planteamiento de estrategias que aporten a la eficiencia energética en la climatización de edificaciones con la necesidad de enfriamiento, en el caso del clima cálido húmedo, predominante en diferentes áreas de la región Caribe de Colombia. Los sistemas de climatización utilizados actualmente para la obtención de niveles de confort térmico incrementan el gasto de energía, principalmente eléctrica que es la más utilizada en el funcionamiento de aparatos de enfriamiento y de ventilación mecánica, lo que potencialmente conlleva también al aumento de emisiones de alto impacto en GEI y CFCs. Para la identificación y propuesta de estrategias se plantea como metodología la realización de análisis de variables condicionantes como la climatología tomando como caso de estudio la ciudad de Montería, Córdoba; haciendo una caracterización de necesidades de confort térmico y de la influencia de la ubicación geográfica en aspectos como la orientación de fachadas y su diseño arquitectónico, de otra parte, mediante una revisión de literatura especializada se propone el estudio de la materialidad para muros externos en cuanto a sus propiedades térmicas. Estos estudios hacen parte de una investigación en curso sobre eficiencia energética aplicada en viviendas hacia el planteamiento de distritos térmicos para el clima cálido húmedo.

ABSTRACT

This paper focuses on an approach of strategies that contribute to energy efficiency in HVAC used in buildings which require cooling in the hot and humid climate that predominates in the Colombian Caribbean region. The air conditioning systems, AC use nowadays for thermal comfort, increase the energy cost mainly electric that is the most used in mechanical ventilation devices and cooling systems and potentially carries rise up the GHG and CFCs. To identify and proposal the low environment impact strategies is applying a methodology making an analysis of environment conditions like climatology of Montería city in Cordoba, Colombia as a study case realizing a characterization of thermal comfort needs and show the influence of the geographical location in aspects like the façade sun orientation and its architectural design on the other hand, through a specialized literature review is proposing a study of the thermal material properties use in external enclosures. These studies

¹ Arquitecta. PhD*. Docente Arquitectura. Universidad Pontificia Bolivariana; york.niampira@upb.edu.co

² Arquitecto. MSc. Docente Arquitectura. Universidad Pontificia Bolivariana

³ Ingeniera Civil PhD. Docente Ingeniería Civil. Universidad Pontificia Bolivariana

are part of an ongoing research project on energy efficiency applied in dwelling design for thermal districts in hot and humid climate

Palabras Clave:

Diseño bioclimático; Montería; Confort térmico; Ahorro de energía; Caribe colombiano.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en las edificaciones se puede abordar principalmente desde dos grandes aspectos: su proceso constructivo analizando el consumo de energía de flujos y recursos, evaluando su ciclo de vida y, en su uso y operación o post-ocupación hacia la minimización del uso de energía para la realización de actividades y climatización que varía de acuerdo a las necesidades dadas por las condiciones de localización geográfica. Colombia por su ubicación en la zona ecuatorial y altura sobre el nivel del mar, tiene regiones donde el uso de sistemas de enfriamiento es imperante.

En Colombia se estima que la refrigeración doméstica consume un 9,4% de energía y en aire acondicionado residencial un 13,4%, mientras que, en sectores como edificios públicos y privados, el consumo es de 33,7% y el 21,8% en supermercados (Minambiente, mayo 2014).

Los sistemas de climatización consumen el 40% de la energía mundial y se espera aumente al 80% en países de economía emergente; limitar el incremento de temperatura del planeta a solo 2°C para el año 2050, implica que las áreas urbanas sean responsables del 85% de ahorro de energía (International Energy Agency, 2016).

Los edificios y el sector de la construcción consumen un tercio de la energía final global y producen directa e indirectamente cerca del 40% de las emisiones de CO₂, tendencia que va en aumento debido a un mayor uso de aparatos y el aumento acelerado de la superficie construida a nivel mundial (International Energy Agency, 2021).

Hacia el cumplimiento de metas en el escenario de desarrollo sostenible, se requiere la reducción de tres cuartas partes de las emisiones globales por parte del sector de la construcción, al igual que mayor innovación en la integración de sistemas de calefacción

y refrigeración adaptados a los diversos climas y tipos de edificación (Abergel & Delmastro, 2020).

La demanda de energía por refrigeración a nivel global también va en aumento por una mayor adquisición de aires acondicionados en hogares. En India entre el 75% y 85% de los hogares urbanos cuenta con aire acondicionado mientras que en Estados Unidos y Australia el 90%, un 20% más que en Brasil a pesar de las posibles necesidades de enfriamiento. Aproximadamente un 35% de la población mundial vive en lugares donde hace calor todos los días y solo el 15% tiene aire acondicionado, pero se prevé que la proporción de uso de aire acondicionado llegue al 60% para el año 2050 y al 70% en 2070 (Abergel & Delmastro, 2020). Otra problemática asociada al uso de aire acondicionado es la implementación de hidroclorofluorocarbonos HCFC y HFC como refrigerantes, sustancias agotadoras de la capa de ozono SAO y de alto potencial de calentamiento global PCG (Minambiente, mayo 2014).

En el uso y operación o post-ocupación de las edificaciones, la eficiencia energética se relaciona con la definición de la envolvente (fachada) y el uso de determinados equipos instalados en la operación de edificios (Balbis, Tovar, Sousa, & Castro, 2018). Se debe tener en cuenta la relación de ventana y pared cerrada; por ejemplo, en el caso de edificios de oficinas para clima cálido en Colombia se recomienda el uso máximo de ventana de 30 a 40% del total de muro. (UPME., 2020).

Teniendo en cuenta la problemática descrita sobre el riesgo de aumento de consumos de energía y generación de emisiones contaminantes por el uso de sistemas de climatización, se propone una investigación para el planteamiento de estrategias de bajo impacto ambiental y alta eficiencia energética, que aporten al alcance de niveles de confort térmico al interior de las edificaciones en el clima cálido húmedo,

puntualmente para la ciudad de Montería, Córdoba Colombia.

El diseño bioclimático es la principal estrategia para evitar o reducir la dependencia de aire acondicionado para el enfriamiento de espacios; para establecer esta nulidad o reducción es fundamental conocer en detalle las características climáticas del lugar de intervención siendo este aspecto el primer punto de partida. El artículo muestra un análisis descriptivo de los factores que intervienen para “un adecuado diseño térmico” desde la planificación de las edificaciones.

1. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES

La localización geográfica y las condiciones climáticas de un lugar son parte del tablero de control de variables aplicables a la planificación de edificaciones y de las ciudades (como lo fue en su origen).

Colombia se encuentra en la zona tropical, franja ubicada entre las latitudes 23° norte y 23° sur. Además de acoger gran cantidad de radiación solar, esta zona recibe la incidencia de forma prácticamente

perpendicular todo el año. Esta situación indicaría por ejemplo que se debe tener especial atención en el planteamiento de la cubierta de las edificaciones y de los espacios subyacentes, sin embargo, esto depende de las condiciones de temperatura existentes que determinarían si es necesario captar o repeler la radiación absorbida. Cabe resaltar que la variabilidad de temperaturas se debe a la altura sobre el nivel del mar, las condiciones de humedad relativa y viento, las cuales están condicionadas por la presión atmosférica, topografía, presencia de biomasa de tipologías de bosques y cuerpos de agua. Esto reafirma la importancia de conocer en detalle las características ambientales de un lugar para identificar las necesidades térmicas de las edificaciones hacia el bienestar de los ocupantes.

La siguiente imagen (figura 1) muestra la necesidad de refrigeración estimada a nivel mundial en 2019, donde se identifica que la zona tropical y las zonas subtropicales son las que tienen mayor demanda. La franja inferior derecha de la imagen indica el valor de *cooling degree days* CDD 18 °C el gradiente hacia el color rojo indica más de 6500 días. En el artículo de Albergel y Delmastro se muestra un estimativo en aumento hacia las zonas subtropicales para el año 2040 y 2070 respectivamente debido al calentamiento global.

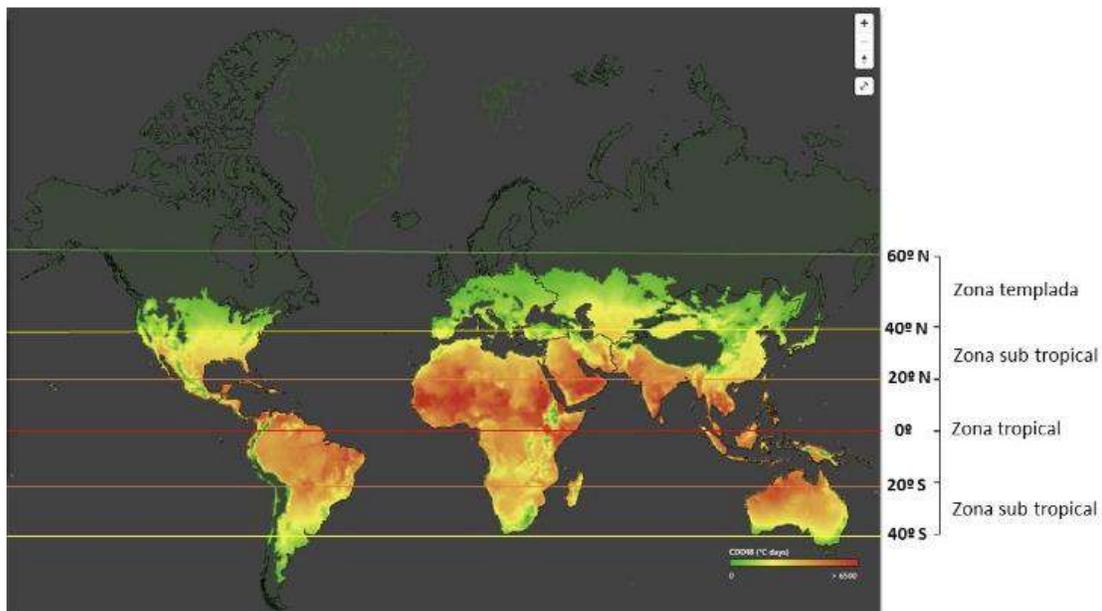


Figura 1. Necesidades de refrigeración a nivel mundial en 2019.

Fuente: (Abergel & Delmastro, 2020)

1.1. Variables climáticas de la ciudad de Montería y sus necesidades de bienestar térmico

La ciudad de Montería está ubicada en el norte de Colombia en la latitud 8,824° Norte y longitud 75,826° Oeste a una elevación de 11 m.s.n.m., características que hacen que sea un lugar cálido. La temperatura promedio anual es de 28 °C, donde la máxima durante el día oscila entre 32 °C y 34 °C y las mínimas entre 22 °C y 23 °C en la madrugada. La ciudad tiene un alto

volumen de pluviometría 1306 mm al año y presencia de lluvias en todos los meses, siendo menos frecuentes en diciembre, enero, febrero y marzo donde la probabilidad no llega a 5 días al mes (figura 2).

La humedad relativa anual en la ciudad de Montería oscila entre 76% y 82% (figura 3.). Debido a la presencia de lluvias, en los meses más secos las horas de brillo solar son de 6 a 8 horas y en los meses lluviosos de 15 a 18 días promedio, el brillo solar es de 4 horas (figura 4.).

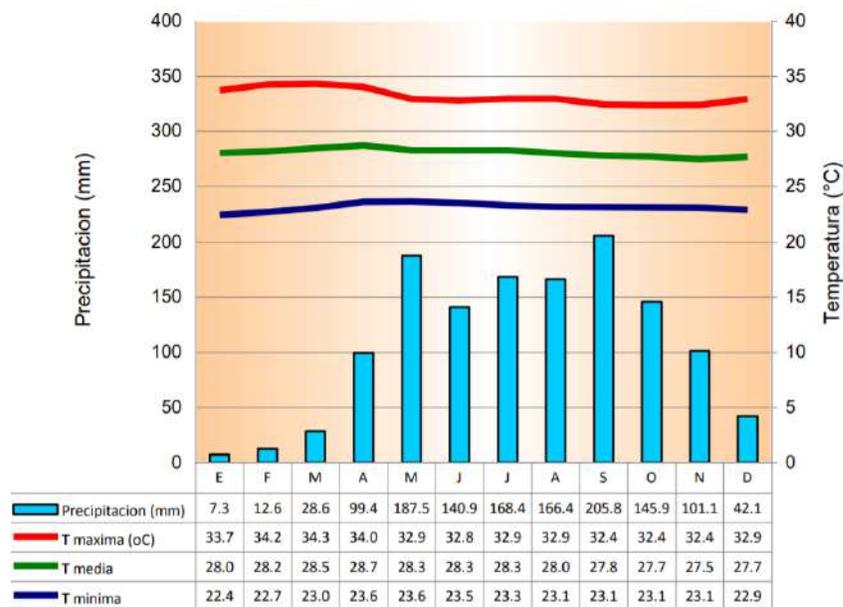


Figura 2. Gráfica de temperaturas y pluviometría de la ciudad de Montería.
Fuente: Atlas climático del IDEAM

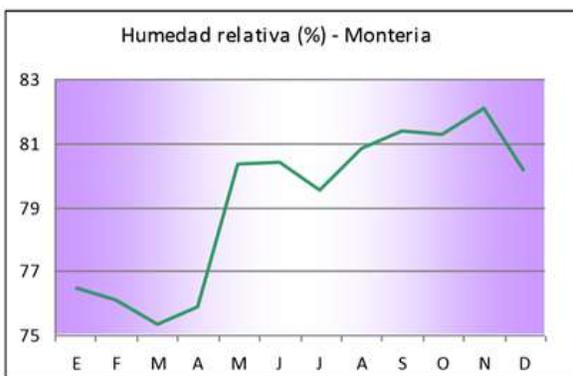


Figura 3. Gráfica de humedad relativa de la ciudad de Montería.
Fuente: El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM

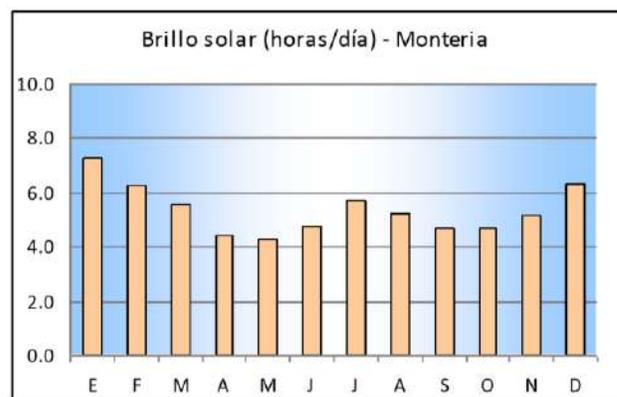


Figura 4. Gráfica de brillo solar por horas al día. Fuente: El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

En la figura 5 se muestra la temperatura en grados centígrados °C (eje Y) por horas al día (eje X) en todos los meses del año. Los puntos en amarillo señalan la temperatura de bulbo seco, los puntos verdes señalan la temperatura de punto de rocío y la franja en gris muestra la zona de confort establecida en el modelo de confort adaptativo de la norma ASHRAE 55-2010.

En las gráficas se observa que en todos los meses la franja con mayor temperatura exterior llega a los 34 °C que va de las 12:00 del mediodía hasta las 4:00 de la tarde siendo esta la franja más seca, pero también la más calurosa del día. Así mismo, se observa que las horas donde se estaría en la zona de confort son la franja de la mañana de las 6:00 a.m. a las 9:00 a.m. aproximadamente y en la tarde de 6:00 p.m. a casi 12:00 a.m. siendo la franja de madrugada la más fresca.

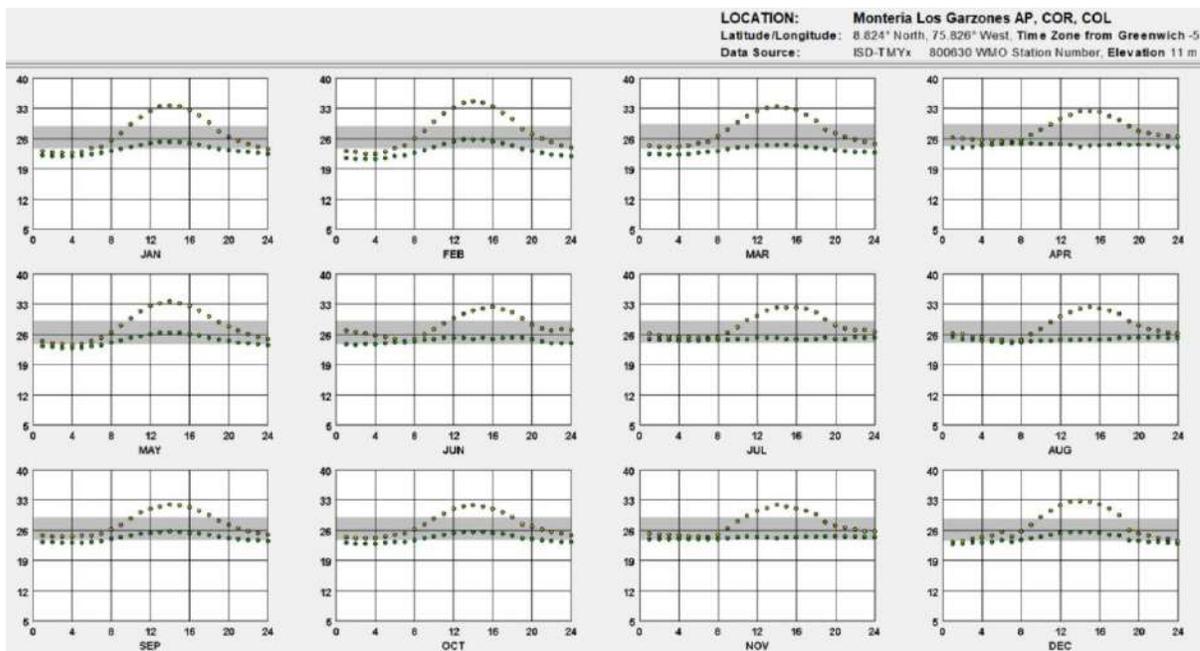


Figura 5. Temperaturas por hora anual de la ciudad de Montería.

Fuente: Visualización en Climat Consultant v.6.0 a partir de los archivos de clima epw de la estación meteorológica Los Garzones

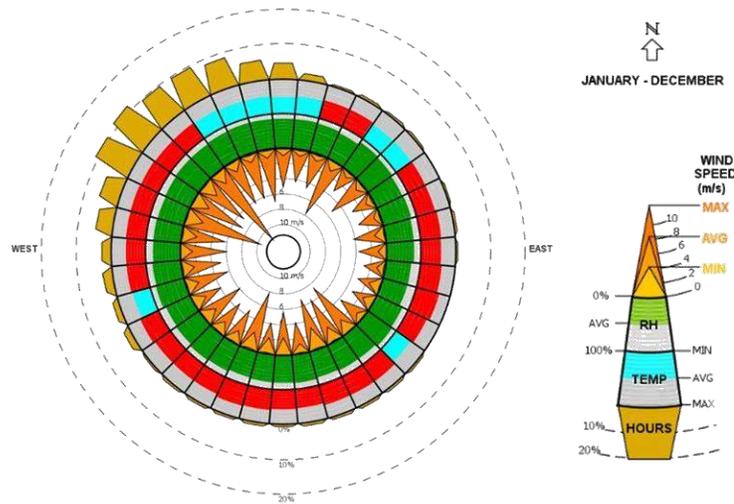


Figura 6. Gráfica de viento de la ciudad de Montería.

Fuente: Visualización en Climat Consultant v.6.0 a partir de los archivos de clima epw de la estación meteorológica Los Garzones

Respecto al comportamiento del viento, la dirección predominante viene del Noroeste y del Norte y, en muy baja medida del Sur. La frecuencia y velocidad a lo largo del año y del día es relativamente baja, 10% y una velocidad promedio de 0 a 3,43 m/s con picos máximos de 10 m/s (figura 6.).

De acuerdo a estas características, el clima de la ciudad de Montería se puede denominar cálido húmedo de acuerdo a la lectura del registro de temperaturas,

humedad relativa y precipitaciones. Para establecer las necesidades de bienestar térmico se recurre a métodos ya conocidos como el diagrama psicrométrico de Baruch Givoni publicado en 1969 en su libro *Man, Climate and Architecture* y a los parámetros del modelo de confort adaptativo de la norma ASHRAE 55-2010. En la figura 7 se muestra la relación de confort térmico para la ciudad de Montería de acuerdo a los datos climáticos de la estación meteorológica Los Garzones.

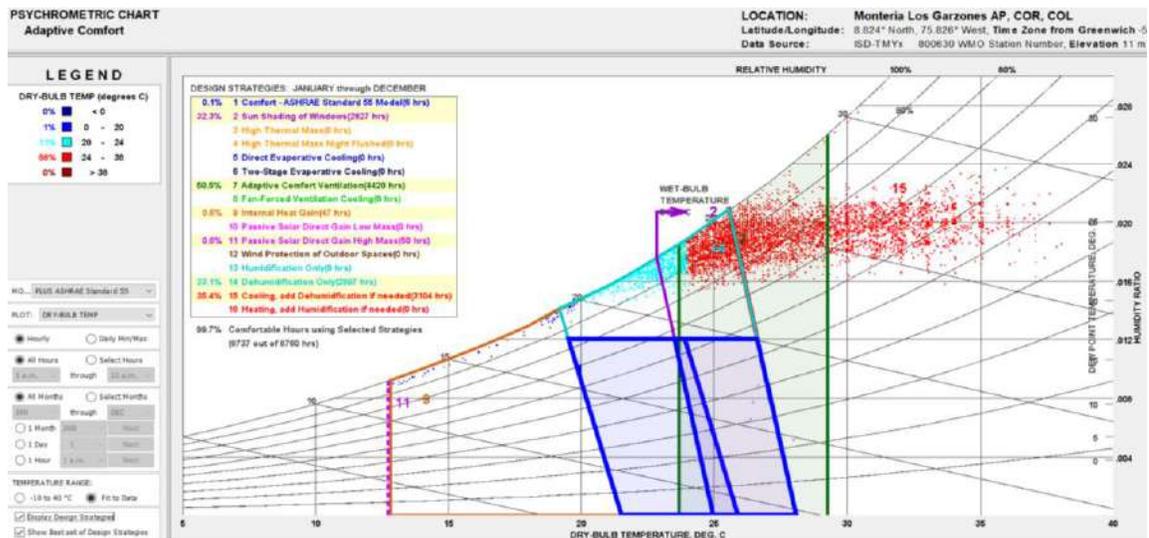


Figura 7. Diagrama de confort de Givoni para la ciudad de Montería.

Fuente: Climate Consultant. V.6.0 Visualización a partir de los archivos de clima EPW de la estación meteorológica Los Garzones.

En el diagrama de la figura 7. se muestra la zona de confort preestablecida sombreada en verde. Los puntos indican la situación por horas al año en la ciudad de Montería, donde se observa que hay un número de horas en la zona de confort y otro número fuera de esta, el diagnóstico general arroja que la ciudad de Montería se encuentra un 50% en zona de confort y otro 50% fuera. De acuerdo al diagrama, se establecen como

estrategias principales la ventilación natural, el uso de aire acondicionado y deshumidificación. Siguiendo la norma (ASHRAE, 2010) 55-2010 se establecen las recomendaciones presentadas en la tabla 1, donde se observa que además de la ventilación y enfriamiento también se recomienda la protección solar en ventanas en un 32,3% lo que permitiría reducir el aumento de temperatura por radiación solar al interior de las estancias.

Tabla 1. Estrategias de confort aplicables para la ciudad de Montería.

Estrategias de aplicación ASHRAE 55-20210

Recomendación	Número de horas
Confort adaptativo por ventilación en un 50,5%	4.420
Deshumidificación en un 33,1%	2.897
Enfriamiento (aire acondicionado) y deshumidificador en un 35,4%	3.104
Protección solar en ventanas en un 32,3%	2.827

Fuente: Climat Consultant v.6.0 valores obtenidos del diagrama psicrométrico de la norma ASHRAE 55-2010 de acuerdo a los datos climáticos de la estación meteorológica Los Garzones.

1.2. Incidencia solar por localización

La trayectoria solar en un lugar depende de la ubicación geográfica determinada principalmente por la latitud, a mayor cercanía de la línea ecuatorial latitud 0° la trayectoria solar y sobre todo la luminosidad se percibe casi uniforme este, oeste, norte y sur por la perpendicularidad del sol. Sin embargo, al analizar el instrumento de carta solar de la ciudad de Montería ubicada a 8,824° Norte, es notoria una ligera progresión del recorrido solar en la cara sur durante algunos meses del año.

En la figura 8 se observa que la trayectoria solar se ubica en el norte en parte del mes de abril y los meses mayo, junio, julio, agosto y parte de septiembre y, en el sur parte del mes de septiembre y los meses octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y parte de abril; también se observa un desplazamiento mayor hacia el sur (franja sombreada en amarillo) en los cuadrantes sureste y suroeste.

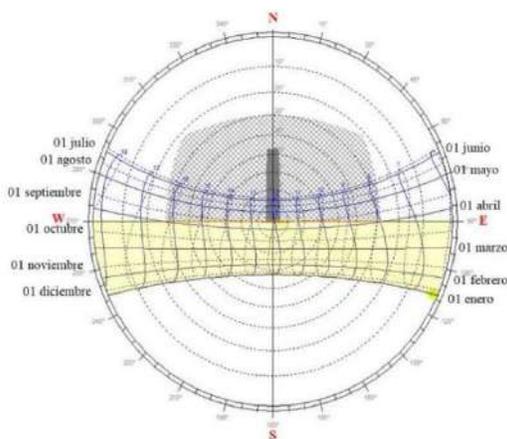


Figura 8. Carta solar de la ciudad de Montería.

Fuente: The solar Tool (Dr. A.J. Marsh).

De este análisis se puede detectar que la cara oeste y noroeste y, en especial la cara suroeste de las edificaciones serían las más afectadas de acuerdo al registro de temperaturas por hora (figura 5.) donde hay un incremento de las 9:00 a.m. hasta las 5:00 p.m., pero con temperaturas más altas en la franja de 12:00 m. a las 4:00 p.m.

Por otro lado, los sistemas de ventilación y la materialidad utilizada en las edificaciones tienen un alto impacto en la sensación térmica interior de los

ocupantes ya que por un lado la velocidad del viento en la ciudad de Montería no es muy alta ni muy frecuente por lo que los elementos constructivos van acumulando energía térmica a lo largo del día que luego van transfiriendo en forma de calor al interior de los espacios.

2. ASPECTO TÉRMICO DE LA MATERIALIDAD

De acuerdo al análisis de las características ambientales de un lugar, se debería prestar especial atención a la selección de los materiales a utilizar en la construcción de edificaciones; los elementos constructivos de fachadas y cubierta son captadores constantes de radiación solar. En la ciudad de Montería la radiación media anual es de 4,0 y 4,5 KWh/m² día (IDEAM, 2021).

Respecto a la escogencia de materiales para un clima cálido húmedo, éstos deben ser resistentes a la humedad y repelentes del calor o al menos que eviten el sobre calentamiento por radiación solar y no transmitan al interior la energía térmica acumulada en forma de calor aumentando las temperaturas existentes.

En el planteamiento de la fachada se debe tener en cuenta la proporción de la parte opaca y la parte traslúcida o de ventana. En un estudio sobre el consumo de aire acondicionado hecho en edificios en Singapur que tiene un clima cálido relativamente similar al de Montería, se encontró que la parte opaca de un edificio residencial de 12 pisos (Objeto de estudio) puede acumular un 30% de calor: un 11% a través de la cubierta (597,6m²) y un 19% a través de las paredes (1.912,32m² de fachada). En otro estudio contenido en el mismo artículo define que el 73% de ganancia o pérdida de temperatura se atribuye a la envolvente.

El diseño de la fachada con aberturas hacia la dirección del viento utilizando la ventilación natural diurna y nocturna podría reducir desde un 20% hasta un 40% la necesidad de uso de aire acondicionado; en el artículo también plantean las ventajas del uso de la ventilación natural en cuanto a la disposición de aire fresco interior, operabilidad por parte del usuario, reducción de costos de operación y disminución de emisiones de

gases de efecto invernadero GEI (Seyedehzahra, Mohd, & Lim, 2016)

En la tabla 2 se muestran las características físicas y propiedades térmicas de los materiales, clave a tener en cuenta para su escogencia e implementación.

Los cerramientos dobles o multicapa tanto en paredes como en cubierta, favorecen la estabilidad térmica (Olgay, 2008), (Serra & Coch, 2009), (Serra F. , 1999), (Neila, 2004), la implementación de aberturas en éstos que permitan el paso del aire, reducen el aumento de temperatura al interior de los espacios (Hausladen, Saldanha, & Liedl, 2006), (Díaz, 2012)

Tabla 2. Características y propiedades de los materiales para su desempeño térmico.
***CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN**

Pared simple	Densidad p Kg/m ³	Espesor m, cm, mm	* Conocer estas características de los cerramientos influye en el cálculo de las propiedades térmicas de resistencia y transmitancia.	
Pared doble o multicapa	Densidad por capa	Espesor por capa	Espesor de cámara	Tipo de material interior
PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES				
Magnitud	Unidad	Utilidad para el clima cálido húmedo		
Calor específico C _p	J/Kg*K	Es propio del material.		
Absortancia α	Coeficiente de 0 a 1	Comportamiento del material respecto a la radiación solar que recibe. Debe ser baja. (Díaz, 2012)		
Emisividad ε	Coeficiente de 0 a 1	Es propia del material. Debe ser alta en el exterior y baja en el interior low-e. (Jelle, S.E., & T., 2015)		
Reflectancia	Coeficiente de 0 a 1	Comportamiento del material respecto a la radiación solar que recibe. Debe ser alta (Díaz, 2012)		
Conductividad térmica λ	W/m.K	Es propia del material. Debe ser baja.		
Resistencia térmica R	m ² *K/W	Relación entre el espesor y conductividad térmica del material. Debe ser alta.		
Transmitancia térmica U	W/ m ² * K	Se relaciona con la resistencia térmica y el número de capas de un cerramiento. Debe ser baja.		

Fuente: Elaboración propia de los autores Niampira, Puche, Urrea, a partir de la consulta de literatura especializada.

Así mismo, es recomendable el uso de materiales aislantes caracterizados por su baja conductividad térmica, los cuales pueden usarse por la cara exterior de la edificación en una fachada doble o recubriéndolos con algún material de acabado, también se pueden instalar al interior, aunque en ese caso es deseable el planteamiento de deshumidificación interior.

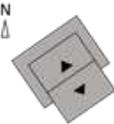
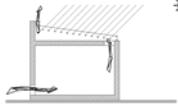
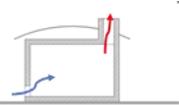
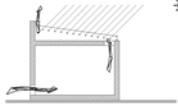
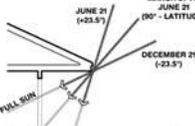
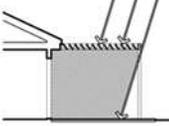
3. PLANTEAMIENTO ESTRATEGIAS

En la sección 1 del presente artículo se determinó que las necesidades de confort térmico para la ciudad de Montería son: ventilación, refrigeración, deshumidificación y protección solar y en la sección 2

se identificaron las características térmicas adecuadas de los materiales a elegir. A partir de esta información, se propone la implementación de sistemas pasivos de ahorro de energía los cuales consisten en el aprovechamiento de las energías naturales disponibles en el territorio, al igual que algunas correcciones del entorno inmediato y el diseño bioclimático.

En la Tabla 3. se muestran las recomendaciones de diseño térmico pasivo para la ciudad de Montería y en la Tabla 4. se muestra un ejercicio de simulación y análisis de elementos de protección solar en fachada dispuestos en las caras norte y sur a lo largo del día, de acuerdo con los datos de azimut y altura solar de la ciudad de Montería.

Tabla 3. Estrategias de diseño bioclimático recomendadas para la ciudad de Montería.

<p>CORRECCIONES DE ENTORNO</p>	<p>Agregar vegetación. Esta estrategia permite el enfriamiento del aire (Serra F. , 1999) la presencia de árboles frente a las edificaciones reduce la temperatura 3°C (Guimarães, 2008) (Muñoz & Torres, diciembre 2013). El follaje de un árbol puede filtrar del 60 a 90% de la radiación solar directa, reflejada y difusa. (Ugarte).</p>			
<p>ESTRATEGIAS DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO</p>	<p>Geometría y disposición del volumen con la orientación adecuada. Esbeltez (paredes más delgadas) y porosidad tanto en planta como en alzado, uso de patios interiores y optimización de la distribución espacial interna.</p>			
<p>SISTEMAS GENERADORES DE MOVIMIENTO DE AIRE</p>		<p>Ventilación natural</p>		
<p>1*</p> 	<p>Extracción con cámara</p> 	<p>Aspiración estática</p> 	<p>Torres de viento</p> 	<p>Ventilación por conductos enterrados</p> 
<p>Efecto chimenea *</p> 	<p>2*</p> 	<p>Aspiración estática *</p> 	<p>Torres de viento *</p> 	<p>Ventilación por conductos enterrados *</p> 
<p>DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN SOLAR</p>				
<p>Voladizos y zonas intermedias</p> 	<p>Aleros calculados con la altura solar</p> 	<p>Protección exterior con pérgolas o vegetación</p> 		

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a la revisión de literatura especializada. 1* imágenes tomadas del software Climat Consultant v.6.0 de acuerdo a los datos de clima de la estación meteorológica Los Garzones, 2* imágenes tomadas de la cátedra de Energía y Arquitectura programa de doctorado 2006 UPC. Prof. Rafael Serra Florensa.

Tabla 4. Simulación de dispositivos de protección solar Solar Tool. (Dr. A.J. Marsh) para la ciudad de Montería.

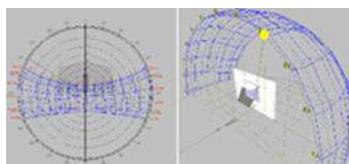
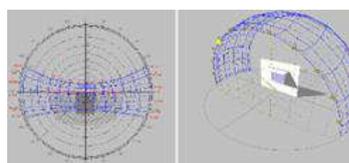


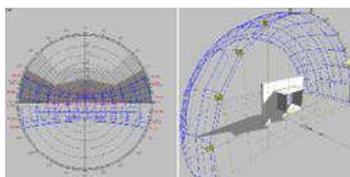
Imagen izquierda, carta solar de la ciudad de Montería. Imagen derecha, propuesta de elemento sombreante horizontal de 80 cm de ancho, dispuesto sobre ventana en la cara norte.

El elemento proporciona sombra en los meses de abril, mayo, junio julio y agosto en la ventana solo a las 12h por lo que se concluye que no es el adecuado para una fachada norte



Propuesta de elemento sombreante horizontal de 100 cm de ancho, dispuesto sobre ventana en la cara sur.

El elemento proporciona sombra en los meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre en la ventana entre las 11h y 13:15h, aunque se amplía el rango de sombra por el aumento de ancho del elemento, no es el adecuado para una fachada sur ya que no cubre todas las horas en que se presentan las máximas temperaturas.



Propuesta de elemento sombreante de 90 cm de ancho, horizontal y vertical en los dos extremos, de una ventana en la cara norte.

El elemento proporciona sombra en los meses abril, mayo, junio, julio y agosto a lo largo de todo el día, por lo que se recomienda el uso de elementos de protección solar horizontales y verticales y aumentar los traslajos en ambos lados para aumentar las horas de protección.

Fuente: Elaboración propia por los autores Niampira, Puche, Urrea, a partir del azimut y altura solar de la trayectoria solar de la ciudad de Montería a diferentes horas y meses del año.

4. CONCLUSIONES

El artículo resalta la importancia de conocer en detalle las características ambientales de un lugar para el diseño de edificaciones, también identificar el comportamiento térmico de los materiales y su ubicación como elementos de construcción, es necesario calcular la relación de la parte opaca y de vidrio en fachada para reducir la transmisión de radiación solar.

El análisis de confort de la ciudad de Montería se realizó con el modelo de confort adaptativo del estándar ASHRAE 55 en la herramienta Climat Consultant.

Las estrategias adecuadas en el caso de los dispositivos de ventilación deben calcularse de acuerdo a las condiciones de dirección y velocidad del viento para su aprovechamiento y forzar el movimiento del aire. Los dispositivos de protección solar, deben calcularse de acuerdo al azimut y altura solar. En fachada el uso de premarcos y elementos sobresalientes ofrecen mayor sombra lo que reduce la transmisión de energía térmica calórica al espacio interior haciendo imperante evitar en lo posible las fachadas completamente planas.

Otros aspectos a tener en cuenta son la inclusión de vegetación que impide el sobrecalentamiento de las superficies, así mismo, una adecuada distribución espacial interior evitando que las estancias más usadas se ubiquen en las caras donde hay mayor soleamiento. Estas recomendaciones definidas por varios autores y aplicadas de forma concreta para la ciudad de Montería, pueden proporcionar mejoras en las condiciones de bienestar térmico de los ocupantes. Aunque es posible que en ciertos espacios y franjas horarias sea necesario el uso de ventilación mecánica y aire acondicionado, la implementación de estas

estrategias de bajo impacto ambiental pueden reducir en alta medida los consumos de energía en climatización, contribuyendo de manera considerable al diseño e implementación de distritos térmicos con alta eficiencia energética.

REFERENCIAS

- Abergel, T., & Delmastro, C. (2020, diciembre 13). International Energy Agency . Retrieved from <https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>
- ASHRAE. (2010). Estándar 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Estados Unidos de América.
- Balbis, M., Tovar, O., Sousa, S., & Castro, P. (2018). Comportamiento del Consumo Energético del Sistema de Aire Acondicionado para un Edificio de Oficinas en Cuatro Zonas Climáticas de Colombia. 7th Academic International Workshop Advances in Cleaner Production for Achieving Sustainable Development Goals (p. 1 a 10). Barranquilla, Colombia: Advances in Cleaner Production Network .
- Díaz, O. (2012, septiembre). La cubierta metálica en el clima cálido húmedo: Análisis del comportamiento térmico del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana. Tesis de maestría en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/41807825.pdf>
- Guimarães, M. M. (2008, septiembre). Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo. Análisis térmico de la cubierta ventilada. Tesis de Maestría en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from <https://www.waie.webs.upc.edu/maema/wp-content/uploads/2016/06/Guimaraes-Mercon-Mariana-Confort-termico-y-tipologia-en-clima-calido-humedo-TC.pdf>
- Hausladen, G., Saldanha, M., & Liedl, P. (2006). ClimateSkin Building-skin Concepts that can do more with less energy . Munich: Birkhäuser.
- IDEAM. (2021, octubre 18). Atlas interactivo climatológico del IDEAM. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- International Energy Agency . (2021, octubre 15). Retrieved from <https://www.iea.org/topics/buildings>
- International Energy Agency. (2016, agosto). International Energy Agency. Retrieved from

- <https://vipo.iea.org/newsroom/news/2016/august/air-conditioning-demand-set-to-grow-rapidly-over-the-coming-decades.html>
- Jelle, B., S.E., K., & T., G. (2015). Low-emissivity materials for building applications: A state of art review and future research perspectives . *Energy and Buildings* , No. 96 pp. 329-356.
- Minambiente, M. d. (mayo 2014). Boletín No. 35 Ozono Programa Ambiental y Energético del Uso de Aire Acondicionado en Edificaciones. Unidad Técnica Ozono Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/boletin_ozono_35.pdf
- Muñoz, C., & Torres, S. (diciembre 2013). Las Fachadas Verdes como Herramienta Pasiva de Ahorro Energético en el Bloque Administrativo de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería . *Dearq*, No. 13 pp. 140-149.
- Neila, J. (2004). *Arquitectura Bioclimática En un entorno sostenible*. Madrid: Munillalera.
- Olgay, V. (2008). *Arquitectura y Clima Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Serra, F. (1999). *Arquitectura y climas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Serra, F., & Coch, R. (2009). *Arquitectura y Energía Natural* . Barcelona : Edicions UPC.
- Seyedehzahra, M., Mohd, F., & Lim, C. e. (2016). The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , No. 53 pp. 1508-1519.
- Ugarte, J. (n.d.). Guía de Arquitectura Bioclimática, construir en países cálidos. San José de Costa Rica: Instituto de Arquitectura Tropical. Retrieved octubre 2021, from <http://www.arquitecturatropical.org/EDITORIAL/documents/GUIABIOCLIMATICA CONSTRUIRCLIMACALIDO.pdf>
- UPME, U. d. (2015). *Plan Energético Nacional Colombia: ideario energético 2050*. Bogotá, Colombia : UPME.
- UPME., U. d. (2020, diciembre). *Cartilla Guía de Planes de Gestión Eficiente de la Energía para Entidades Públicas*. Bogotá, Colombia. Retrieved from https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Cartilla_GEE.pdf

Diseño de soluciones de climatización en proyectos residenciales multifamiliares, conectados a distritos térmicos.

Andrés E Velásquez L¹
andres@bt-consultores.com

RESUMEN

Los desarrollos inmobiliarios residenciales son responsables de buena parte del impacto ambiental, generando una importante huella de carbono. Dentro de estos impactos, destacan los sistemas de climatización que son responsables de entre el 40% y el 60% del consumo energético de esos edificios. Los Distritos Térmicos como solución de climatización eficiente y sostenible pueden ser un elemento transformador de la tecnología de climatización en proyectos dirigidos a segmentos socioeconómicos medios y altos. Este trabajo pretende establecer el marco conceptual para el diseño óptimo de sistemas residenciales que se conecten a los Distritos Térmicos, estableciendo las diferentes opciones y sus impactos en términos de inversión y operación desde la perspectiva de los diferentes grupos de interés. Se presentará un proceso de diseño de un edificio residencial que estará conectado a un Distrito Térmico. Analizando cada paso, para demostrar el impacto del tipo de control hidrónico en el CAPEX y OPEX del Proyecto. Planteando una solución novedosa y que satisface los requerimientos de los diferentes grupos de interés, a nivel de control hidrónico para el desarrollo de sistemas residenciales conectados a distritos térmicos.

ABSTRACT

Residential real estate developments are responsible for a good part of the environmental impact, generating a significant carbon footprint. Within these impacts, air conditioning systems stand out which are responsible for between 40% and 60% of energy consumption of those buildings. Thermal Districts as an efficient and sustainable air conditioning solution can be a transformative element of the climatization technology in projects aimed at medium and high socioeconomic segments. This paper intent to establish the conceptual framework for the optimal design of residential systems that connect to Thermal Districts, establishing the different options and their impacts in terms of investment and operation from the different stakeholder's perspective. A design process of a residential building that will be connected to a Thermal District will be presented. Analyzing each step, to show the impact of the type of hydronic control in Project's CAPEX and OPEX. Proposing a novel solution that satisfies the requirements of the different stakeholders, at the level of hydronic control for the development of residential systems connected to thermal districts.

¹ Ingeniero, Ms. ME; Building Technology Consultants SAS, CEO; Bogotá, Colombia; andres@bt-consultores.com , +57 315 303 4309

Palabras Clave: Distritos Térmicos, Sistemas residenciales de CAVR, Construcción Sostenible, Sistemas de agua helada, Control Hidrónico, Aire Acondicionado, Residencias Multifamiliares, Internet of Things, Eficiencia energética.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los Distritos Térmicos o Distritos de Frio en Colombia pasó de ser una expectativa a una realidad que ya experimentan varios edificios en ciudades como Medellín, Cartagena, Montería y otras próximamente.

El autor ha participado en el desarrollo de proyectos forma directa desde el año 2005 hasta la fecha, logrando materializar sus diseños y conceptos en instalaciones operativas y funcionales. Desde el año de 2016 y con motivo del “DCE² WORKSHOP. DISTRICT COOLING FOR EFFICIENT ENERGY” (Figura 1) organizado por el Banco Mundial y EPM, el Autor y su equipo de trabajo en Building Technology Consultants de Colombia han planteado soluciones para masificar la aplicación de distritos térmicos en unidades residenciales multifamiliares por ser un mercado masivo y de alto impacto a nivel de ahorro de energía y sostenibilidad.

En una aplicación de tipo residencial, se impone la regla que “nadie invierte para que otro ahorre” lo cual se aplica en el caso que, aunque el ahorro en OPEX cuando se usan distritos térmicos, compensa las mayores inversiones en CAPEX de forma rápida y proporcionalmente mayor, la cadena promotor-constructor-comprador no está dispuesta a asumir mayores inversiones para que los usuarios-operadores de distritos térmicos se beneficien de menores costos operativos. El desafío principal es lograr que los balances económicos actuales no se vean afectados, pero se logre promover el uso de distritos térmicos como herramienta para mejorar la sostenibilidad de los edificios en todas las dimensiones. El objetivo del presente trabajo es describir la metodología de diseño y considerandos del mismo utilizados para el desarrollo de proyectos de climatización de residencias multifamiliares conectadas a distritos térmicos.



Figura. 1. Comparación costos total de propiedad por TR instalada entre distritos térmicos y sistemas minisplits de expansión directa eléctricos.

Elaboración propia para el “DCE² WORKSHOP. DISTRICT COOLING FOR EFFICIENT ENERGY”, Medellín Junio 9 y 10 de 2016.

Para un proyecto de desarrollo inmobiliario es posible identificar entre diez y veinte grupos de interés (compradores, usuarios, constructores, diseñadores, gobiernos, empresas de servicios, públicos, etc.) que interactúan y condicionan muchas de las decisiones que sobre el tema de la climatización impactan a un apartamento. Lo cual implica que para lograr un verdadero impacto positivo en la aplicación de distritos térmicos en el sector residencial multifamiliar sea necesario identificar y conciliar los diferentes objetivos e intereses de cada uno de estos actores, lo que reviste una alta complejidad al externalizar parte de la infraestructura. Este punto se describirá en la **Sección 1: “Requerimientos y Grupos de Interés”**, explicando cómo se involucra un nuevo y esencial aglutinador para que la solución pueda ser transversal a lo largo del ciclo de vida del proyecto: el **Operador del Distrito Térmico (ODT)**.

El segundo desafío encontrado en el desarrollo de estos sistemas es el Hidrónico. La aplicación de sistemas de agua helada de múltiples terminales se basa en redes de distribución que se tienden de forma aproximadamente simétrica desde el punto de bombeo y logran mantener caídas de presión equivalentes en cada ramal. El equilibrado hidráulico es imperativo pero las fronteras de propiedad y responsabilidad deben ser claramente definidas para que el diseño atienda esas necesidades. En la **Sección 2: “Hidráulica aplicada a distritos térmicos residenciales”** se profundizará en este aspecto.

Para el correcto dimensionamiento tanto de los equipos a utilizar como de las redes y accesorios de las mismas es necesario comprender y plantear el método de cálculo y predicción de la demanda térmica de los diferentes espacios y sistemas conectados al distrito térmico y cómo físicamente se refleja en una sumatoria de caudales y mezcla de temperaturas, por lo tanto, los métodos tradicionales de dimensionamiento de tuberías no se deben aplicar de forma indiscriminada. En la **Sección 3: “Demanda térmica, diseño de redes y equipos terminales”** se

tratará este punto y su interrelación con los controles utilizados, aplicados a un ejemplo de un conjunto residencial conectado a un distrito térmico.

La diferencia fundamental entre un Distrito térmico y una planta de agua helada es el concepto de un tercero independiente que realiza inversiones y gestiones para vender energía térmica a usuarios, que en el caso residencial, estos usuarios no tienen ni requieren de conocimientos ni competencias especializadas en la materia, por lo tanto, los sistemas de medición, automatización y digitalización del servicio se convierten en la era actual en el punto esencial para el éxito y eficiencia de estas instalaciones. En la **Sección 4: “Digitalización y gestión de la energía térmica”** se establecerán las posibilidades de desarrollo y el grado de digitalización que permitirá comparar los sistemas de control convencionales con un nuevo modelo de control desarrollado por el Autor y su equipo de trabajo en BT CONSULTORES, para esta aplicación llamada Control Hidrónico Multizona (CHM). Al final se presentarán en la **Sección 5: “Conclusiones y recomendaciones”**

1. REQUERIMIENTOS Y GRUPOS DE INTERES

Un diseño adecuado parte de la identificación clara y precisa de los requerimientos que debe cumplir el mismo a todo nivel. En el caso de la aplicación de distritos térmicos para climatización de unidades residenciales, se deben identificar los requerimientos de cada uno de los grupos de interés involucrados. De acuerdo a la metodología aplicada por BT Consultores para análisis y diseño de sistemas de distritos térmicos, estos se subdividen en cinco partes que se ilustran en la figura 2. Para definir los requerimientos de cada una de estas partes en relación a los diferentes grupos de interés, se preparó la tabla 1.



Figura 2. Esquema de componentes de un distrito térmico residencial.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Requerimientos de los sistemas según grupo de interés

Grupo de interés	Producción de frío	Distribución de Frío					Enfriamiento aire	
		Red primaria	Estación de transferencia	Red Comunal	Medidor conexión	Red privada	Distribución aire	
Operador Distrito Térmico (ODT)	Rentabilidad Eficiencia Sostenibilidad Confiabilidad Disponibilidad Automatización	Confiabilidad Bajo costo/ml. Selección adecuada. Balanceo hidráulico	Confiabilidad Disponibilidad Precisión Flexibilidad Automatización comunicación	Confiable Baja caída de presión Flexibilidad. Balanceo hidráulico	Precisión Control Confiable Comunicación y lectura remota	Bajas pérdidas Confiabilidad Bien dimensionada. Balanceo hidráulico.	Equipos confiables Capacidad certificada Parámetros de operación Control temperatura de retorno de agua.	
Usuario Comprador	Confiabilidad Estabilidad de temperatura de suministro Bajo impacto ambiental.	Confiabilidad	confiabilidad	Confiable	Precisión Certificación Calibración Acceso a lecturas	Tamaño reducido Bajo impacto en arquitectura flexible	Estéticos Eficientes Costo comparable a DX Bajo ruido Fácil de operar Repuestos Servicio técnico	
Promotor Constructor	Bajo impacto estético y ambiental que no afecte a los proyectos	Confiable	Espacio reducido Bajo consumo de energía Bajo ruido	Confiabilidad Materiales comunes Acceso a servicio	Fácil acceso y montaje. Servicio técnico	Confiabilidad Fácil construcción Acceso a repuestos	Uso del espacio adecuado. Instalación y pruebas de bajo impacto	
Propiedad Horizontal	Confiabilidad Estabilidad	confiable	Mantenibilidad Bajo consumo Bajo ruido. Discriminación de Opex	Acceso para servicio Cero fugas repuestos	Fácil acceso Seguro calibrado	Fácil acceso y ubicación	Repuestos Aislamiento de otras vivienda.	
Gobierno	Incentivos Bajas emisiones Bajo ruido Reducida huella de carbono	Permiso de Uso de vías públicas. Impacto ambiental	Calibración Normas	Cumplimiento Normas	Homologado	Cumplimiento normas	Baja huella de carbono.	

2. HIDRÓNICA APLICADA A DISTRITOS RESIDENCIALES TÉRMICOS

La hidrónica entendida como la utilización del agua en procesos de transferencia de calor, agrupa diferentes variables físicas como la temperatura, flujo, presión y velocidad para determinar el comportamiento de flujos de calor.

Existen dos procesos definidos por el sentido del flujo de calor: La **Refrigeración Hidrónica** que consiste en tomar calor de un medio y transferirlo al agua y la **Calefacción Hidrónica** que es tomar calor del agua y transferirlo a un medio.

En los distritos térmicos para aplicaciones de climatización de unidades residenciales se utiliza la refrigeración hidrónica donde el flujo de calor va desde el aire que se acondiciona hasta el evaporador de los enfriadores de agua de la planta de producción de frío, para una cantidad de calor determinado, a mayor diferencial de temperatura entre la entrada y

la salida de agua, es necesario menor flujo de la misma, simultáneamente el flujo de agua esta determinado por el gradiente de presión que se presenta en el sistema de conducción. Es decir, el parámetro que determina el flujo total de calor hacia el sistema de producción de frío es la temperatura de la mezcla de los retornos de cada uno de los terminales utilizados. Dada la naturaleza del flujo de agua en un distrito térmico los sistemas de distribución de frío se diseñan para un caudal máximo que puede hacer circular las bombas. En la medida que se disminuye el diferencial de temperatura, la capacidad de transferencia de calor disminuye y es necesario incrementar el caudal para lograr la misma capacidad térmica. Dado que los sistemas de producción de frío tienen un caudal de agua máximo permitido y que los mismos sistemas de distribución de frío tienen límites de velocidad de agua en la tubería, la compensación de caudal solo es posible hasta el flujo de diseño.

En la figura 3 se presenta la relación entre los componentes típicos de un distrito térmico y el valor de la temperatura de retorno.



Figura 3. Flujo de calor en un distrito térmico

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de enfriamiento de aire se dimensionan para que la transferencia de calor en el punto de diseño sea de la magnitud adecuada para mantener la temperatura y humedad objetivos.

Las metodologías de cálculo de cargas térmicas se basan en computar las máximas fuentes de calor coincidentes en una hora, durante un periodo de tiempo determinado (generalmente un año – 8760 horas). Sin embargo, para un espacio específico la carga de diseño no se da sino cuando se presenten las condiciones que dieron lugar al cálculo, basados en una proyección estadística del clima.

Lo anterior significa que si se estima que en determinado mes del año (por ejemplo junio) es el mas susceptible, por incidencia solar y clima a presentar la carga de diseño durante el periodo de 3:00 p.m. a 6:00 p.m., solo 90 horas al año presentaran la carga térmica de diseño siempre y cuando la irradiación solar supuesta, las personas, iluminación y consumos de energía se mantengan a los niveles previstos. Es decir que aproximadamente el 99% del tiempo no se presentarán dichas cargas térmicas y por lo tanto trabajará a cargas parciales.

El efecto de una carga térmica sobre un equipo de refrigeración hidrónica esta descrito por la siguiente ecuación:

$$Q = \dot{m} * C_p * (t_o - t_i) \quad [1]$$

Donde:

Q Calor transferido por unidad de tiempo

\dot{m} Flujo másico de agua

C_p Calor específico del agua

t_o Temperatura de salida (retorno al sistema de producción de frio)

t_i Temperatura de entrada (suministro desde el sistema de producción de frio).

El resultado del proceso de enfriamiento de aire es la temperatura de retorno la cual se determina de esta forma:

$$t_o = t_i + \frac{Q}{\dot{m} * C_p} \quad [2]$$

Es decir, cuando la carga térmica se reduce, el valor de t_o también disminuye si el flujo másico es constante, o se mantiene igual si el flujo másico se

reduce en la misma proporción que se redujo la carga térmica.

Otro aspecto es la influencia del cambio de las condiciones objetivo de temperatura y humedad en la temperatura de retorno de agua en un sistema de enfriamiento de aire hidrónico. La transferencia de calor entre al aire y el agua, se rige por el diferencial de temperatura entre el aire entrando y el agua entrando (suministro del sistema de producción de frio). Por lo tanto, en la medida que el aire entrando, disminuye su temperatura, el calor que se transfiere, también se reduce, dando como resultado una carga parcial y no la de diseño.

Como los equipos usados para el enfriamiento del aire operan en cerca del 99% del tiempo a cargas parciales, se hace imperativo definir las opciones para controlar la capacidad de dichos equipos frente a esta situación.

El propósito de un sistema de enfriamiento de aire es lograr una temperatura objetivo en el ambiente que se está climatizando. Para esto se pueden plantear dos estrategias: cuando la temperatura del ambiente llegue al nivel deseado, se debe quitar la potencia térmica mediante el cierre de la válvula de control de agua, posteriormente, al recibir nuevamente flujos de calor y elevarse la temperatura ambiente, el equipo ordena abrir nuevamente la válvula. Generándose un patrón de ciclos de aperturas y cierres. Este tipo de control discreto u ON/OFF es el mas común y de bajo costo.

El otro tipo de control se basa en disminuir el flujo másico del agua en función de una disminución de la carga térmica, logrando una temperatura de retorno constante.

El control ambiental debe calcular la desviación entre el punto de consigna y el valor de la temperatura instantánea, cuando esta diferencia se aumenta, se ordena abrir un poco la válvula y si aún sigue incrementándose la diferencia medida, se vuelve ordenar la apertura, hasta que se logre estabilizar. En caso que la diferencia se reduzca, la válvula tiende a cerrarse. Este control es más complejo por que

requiere mediciones permanentes, y un controlador que ordene la apertura y cierre de la válvula y un algoritmo que opere esta secuencia. Este tipo de control se llama proporcional o modulante.

En conclusión, de la forma como se controla la capacidad de los sistemas de enfriamiento de aire, depende el valor y estabilidad de la temperatura de retorno del agua hacia la planta de enfriamiento. Es por esta razón que el primer paso para el diseño de una aplicación residencial conectada a un distrito térmico es elegir el tipo de control a utilizar.

3. DEMANDA TÉRMICA, DISEÑO DE REDES Y EQUIPOS TERMINALES

a. Demanda térmica

El diseño de las redes de tubería depende exclusivamente del tipo de control hidrónico a utilizar en el edificio. Si cada uno de los terminales que realizan el proceso de enfriamiento de aire (Fan coils) posee un control discreto (ON/OFF), la red debe diseñarse con este condicionante y por ende los flujos a garantizar, diámetros de tubería y cabezas de presión requeridas para impulsar el agua a todo lugar y en todo momento, de la red, serán determinadas por el diseño y cálculo de dicha instalación. Si, por el contrario, se determina un control modulante o proporcional, las consideraciones de diversificación de flujos y computo de caudales por ramal, están asociados a las simulaciones de carga térmica hora-hora (8760 horas al año) de los espacios conectados a la red, en las agrupaciones definidas (Ramales, unidades residenciales y espacios dentro de cada unidad). Este proceso implica millones de cálculos y simulaciones que solo los softwares especializados y herramientas de análisis de dichos datos permiten lograr los resultados aplicables en cada caso.

La carga térmica instantánea de un espacio, unidad residencial o edificio es la cantidad de calor que se debe remover para lograr las condiciones ambientales que solicitan los usuarios en cada momento, sin exceder las condiciones acordadas desde el diseño. Como en los distritos térmicos se utiliza refrigeración hidrónica, toda la carga térmica

instantánea se transfiere al agua, dando como resultado un flujo determinado y una temperatura de retorno resultante. Cuando en este documento se refiera a esta carga que no está bajo el control del ODT sino de los usuarios, se mencionará como Carga térmica (CT) asociada al espacio, unidad residencial, edificio o conjunto de edificios que se estén analizando. Como todo proceso de ingeniería debe ser acompañado de criterio profesional basado en experiencias y comprensión de los fenómenos físicos involucrados, por lo tanto, los métodos descritos en este capítulo no pueden ser usados indiscriminadamente y solo profesionales especializados y expertos deben acometer estas labores.

El proceso de diseño de sistemas de aire acondicionado y las metodologías a aplicar al mismo, se encuentran en la literatura especializada y no es el propósito de este trabajo describir dichos procesos. Para efectos de la discusión y análisis de este fenómeno vamos a definir los siguientes términos:

CARGA TÉRMICA DE DISEÑO DE UN ESPACIO (CTDE): Es el valor calculado de la potencia térmica máxima (kWt- BTU/h) requerida para vencer las cargas térmicas sensible y latente que se presentan a lo largo del conjunto de todas las horas del año, para obtener unas condiciones ambientales específicas (condiciones de diseño) que están definidas por los estándares técnicos. Esta carga térmica está expresada en la necesidad de un caudal de aire de suministro a unas condiciones psicrométricas de salida de aire (temperatura sensible y temperatura de bulbo húmedo) y unas condiciones hidrónicas (flujo másico de agua a unas condiciones de temperatura de suministro y retorno).

CARGA TÉRMICA DE DISEÑO DE UNA UNIDAD RESIDENCIAL (CTUR): Es el valor máximo de la suma de las CTD de cada uno de los espacios, en cada hora del año, que componen una unidad residencial en el conjunto de todas las horas del año.

FACTOR DE DIVERSIDAD CTUR (FDCTUR): Es la CTUR dividida por la suma de las CTDE conectadas a la unidad residencial analizada y expresada en porcentaje. Un FDCTUR de 100% significa que algún momento del año el sistema demandara

simultáneamente la carga máxima de cada uno de los espacios agrupados en dicha unidad residencial.

CARGA TÉRMICA DE DISEÑO DE UN RAMAL COMUNAL (CTRC): Es el valor máximo de la suma de las CTUR de cada una de las unidades residenciales conectadas a un ramal de distribución en el conjunto de todas las horas del año.

FACTOR DE DIVERSIDAD CTRC (FDCTRC): Es la CTRC dividida por la suma de las CTRU conectadas al ramal analizado y expresada en porcentaje. Un FDCTRC de 100% significa que algún momento del año el sistema demandara simultáneamente la carga máxima de cada una de las unidades residenciales conectadas a dicho ramal.

CARGA TÉRMICA BLOQUE DE EDIFICIO (CTBE): Es el valor máximo de la suma de las CTRC conectadas a una estación de transferencia en el conjunto de todas las horas del año.

FACTOR DE DIVERSIDAD CTBE (FDCTBE): Es la CTBE dividida por la suma de las CTRC conectadas a la estación analizada y expresada en porcentaje. Un FDCTBE de 100% significa que algún momento del año el sistema demandara simultáneamente la carga máxima de cada uno de los ramales conectados a dicha estación de transferencia (edificio).

CAPACIDAD EQUIPO TERMINAL (QET): Es la capacidad del equipo a las condiciones de selección, para vencer la CTDE del espacio a atender. Como los equipos son fabricados en tamaños aproximadamente estándar entre diferentes fabricantes, se determina una selección estándar que garantiza el cumplimiento de las condiciones requeridas para vencer las CTDE en todo momento.

La carga térmica instantánea de un edificio no depende sino de la operación del mismo y los factores que la componen, es decir si hay equipos operando, estos están buscando lograr el punto de consigna que logre el confort de los ocupantes, por lo tanto y de acuerdo a las teorías de confort no todos los ocupantes de un edificio perciben las condiciones de la misma manera y siempre habrá un porcentaje insatisfecho que estará modificando los puntos de consiga. De acuerdo a la definición empleada de confort: *“El confort es la condición ambiental tal, que el sujeto no realiza acción alguna para modificarla.”* De

acuerdo al estándar ASHRAE 55.1 se considera que un sistema de climatización está en el rango de confort cuando menos del 10% de los ocupantes se manifiestan insatisfechos, dado que es imposible lograr el 100% de satisfacción al ser una sensación individual y dependiente de múltiples factores. Por lo tanto, aunque se utilizan condiciones ambientales de diseño para realizar los cálculos de predicción de cargas térmicas, se debe tener en cuenta que existen muchos factores que implican que los puntos de consigna se van a modificar y no necesariamente dentro de los rangos previstos. Por lo que los sistemas deben garantizar que en cualquier momento un espacio dado pueda atender la CTDE y de acuerdo al criterio del diseñador, añadir una tolerancia de diseño.

Otro fenómeno que influye en el diseño de las redes son los **FACTORES DE USO (FU)**, que son valores entre 0 y 100% que pueden afectar las cargas previstas y cuyo propósito es tener en cuenta que no todos los espacios y unidades residenciales están activos al mismo tiempo y que solo una fracción de ellos coincide. Estos factores son muy útiles para modelar la demanda térmica a vender en un distrito térmico, pero no son recomendables para involucrarlos a nivel de diseño de redes e infraestructura de distribución, dado que no existe ninguna condición que permita inferir que dichos factores se pueden controlar o garantizar.

b. Diseño de redes con sistemas ON/OFF - discretos o híbridos (discretos + modulantes)

Para el diseño de las redes con este tipo de control se deben tener presente las siguientes reglas:

- Cada red de alimentación a un equipo terminal debe dimensionarse para el flujo de diseño que cumpla la CTDE
- Cada Unidad residencial debe dimensionarse con una red que cumpla la suma de los flujos de cada terminal conectado.
- Cada ramal debe dimensionarse para la suma de flujos de las unidades residenciales conectadas.
- Cada estación de transferencia debe dimensionarse para el flujo total conectado a ella y que es la suma

de los flujos de los ramales conectados a dicha estación.

- La condición de diseño es el 100% del flujo con la suposición de todas las válvulas abiertas en el momento de máxima demanda.

Los sistemas de bombeo se deben diseñar para operar en velocidad variable en función con el cierre de las válvulas que no estén habilitadas para operar o estén cerradas por haber logrado el punto de consigna. El flujo de agua instantáneo y la consecuente velocidad de rotación de las bombas, se establece mediante la medición del diferencial de presión del terminal más lejano, desde el punto de vista hidráulico, conectado a la red. Aplicando una secuencia de flujo variable con transmisor de presión.

c. Diseño de redes con sistemas modulantes o proporcionales.

Para el diseño de las redes que posean este tipo de control, se deben tener en cuenta las siguientes reglas:

- Cada red de alimentación a un equipo terminal debe dimensionarse para el flujo de diseño que cumpla la CTDE
- Cada Unidad residencial debe dimensionarse con una red que cumpla la suma de los flujos de cada terminal conectado. Es decir, usar $FDCTUR=100\%$. En casos donde este factor sea inferior al 50% se puede realizar un análisis particular beneficio/costo de disminuir el tamaño de la red interna de las unidades residenciales.
- Cada ramal se debe dimensionar en función de la CTRC calculada, más un factor de seguridad que es función del $FDCTUR$, en la medida que el factor de diversidad es menor, se debe incrementar el factor de seguridad en flujo.
- Cada estación de transferencia se debe diseñar para CTBE calculada, más un factor de seguridad que es función del $FDCTBE$, en la medida que el factor de diversidad es menor, se debe incrementar el factor de seguridad en flujo.
- La condición de diseño es el flujo de la estación de transferencia con la suposición de todas las válvulas abiertas en el momento de máxima demanda, pero reguladas a aperturas parciales que ajustan los

caudales a las cargas instantáneas y por lo tanto el flujo máximo es el correspondiente al CTBE.

Los sistemas de bombeo se deben diseñar para operar en velocidad variable en función al cierre de las válvulas en cada momento. Las que no estén habilitadas para operar no tendrán flujo, las operativas estarán la posición correspondiente a la carga térmica atendida. El flujo de agua instantáneo y la consecuente velocidad de rotación de las bombas, se establece mediante la medición del diferencial de presión del terminal más lejano, desde el punto de vista hidráulico, conectado a la red.

d. Ejemplo de dimensionamiento de red por criterios de control hidrónico

Para un proyecto multifamiliar en el Caribe, conectado a un distrito térmico con temperatura de suministro de 40°F [4.44°C] y temperatura de retorno de 54°F [12.22°C], (interno al proyecto: suministro 44°F [6.66°C] y retorno 56°F [13.33°C]) se tienen dos etapas de construcción como se explica en la figura 5.

En la figura 5 se observa que el control hidrónico proporcional, permite una red de menores dimensiones al tener un caudal total de diseño de $2,028\text{ gpm}$ [$0.127\text{ m}^3/\text{s}$] contra los $2,875\text{ gpm}$ [$0.181\text{ m}^3/\text{s}$] de la red con válvulas discretas. El mayor impacto se nota en las redes de distribución comunales y estaciones de transferencia. El costo de inversión es proporcional al caudal de diseño, dado que no se pueden sobrepasar lineamientos de velocidad máxima del agua (10fps [3.05 m/s]).

De acuerdo a los cálculos de la red en tubería de HDPE aislada se obtuvo que la cabeza de presión para el caso de control modulante es de 150 ft [45.7 m] H_2O y para el caso de control discreto es de 180 ft [54.9 m] H_2O , siendo una red de mayores diámetros. Como la potencia necesaria es función del caudal y la cabeza, en el caso de la red con control discreto se requiere más del doble de la energía por TR (aprox. $0,18\text{ kW/TR}$) que en la red con control modulante (Aprox. $0,08\text{ kW/TR}$). Lo anterior implica que la infraestructura y costos de inversión de las estaciones de transferencia también se duplican aproximadamente.



Figura 5. Datos de diseño redes de distribución proyecto ejemplo según tipo de control usado.

Fuente: Building Technology Consultants, 2021

Con respecto al diferencial de temperatura (DT) se encontró que en el mejor de los casos con la red hidráulica con control discreto, se obtenía un DT Promedio = 6,5 °F [3.61 °C]. En la red con control modulante, se logra mantener el DT de diseño que es de 12 °F [6.67 °C]. La implicación, como se discutió anteriormente es que se baja la temperatura de retorno interna promedio a 50,5 °F [10,27 °C], obligando a la temperatura de retorno al sistema de producción de frío a bajar a 48,5 °F[9.17 °C], reduciendo el DT del primario de 14 °F[7,77 °C] a 8,5 °F[4.72 °C] (40% menos) lo que determina que, para transferir la misma energía térmica, se requiere un caudal 26% mayor en la red primaria, con sus consecuentes incrementos en costo de operación. Esta disminución en la temperatura de retorno que llega a la planta de producción de frío, afecta también la eficiencia de la misma e incrementa los costos de producción de cada TR vendida.

4. DIGITALIZACIÓN Y GESTIÓN DE LA ENERGÍA TÉRMICA

Los distritos térmicos venden energía térmica que debe ser medida mediante dispositivos que midan el flujo de agua y simultáneamente las temperaturas de suministro y retorno. Con estos datos se calcula la cantidad de calor transferido al agua o desde la misma, determinando el consumo como la integración de dicha potencia en un periodo de tiempo. Cuando se incorpora en un sistema de control hidráulico un medidor de energía térmica a la entrada de cada unidad residencial y este se integra a una red de comunicación que le permita al ODT



Figura 6. Comportamiento DT en el día de diseño según tipo de control.

Fuente: Building Technology Consultants, 2021

obtener las lecturas de forma remota, ya se están estableciendo las bases para una gestión digital.

El punto central está en que la inversión necesaria para la implementación de los sistemas de control hidráulico modulante está al lado del usuario-promotor-constructor y estos grupos no identifican como necesario incrementar sus inversiones en pro del beneficio del prestador del servicio. El costo de implementar un sistemas proporcional, frente a un sistema de control hidráulico discreto (ON/OFF)es prácticamente el triple, mientras un Fancoil hidráulico estándar, similar al de los minisplits posee inherentemente un control de temperatura basado en la temperatura de retorno del aire, activando un contacto para abrir o cerrar la válvula de control según sea la situación, el control proporcional requiere medición de la temperatura ambiente, un controlador que compare esta temperatura con el punto de consigna, determine el error y emita una señal proporcional al mismo para que el actuador de la válvula la posicione y retroalimente dicha posición con el fin de ajustar el proceso.

El desafío identificado fue el de compatibilizar los sistemas discretos que están implementados en la mayoría de los terminales aplicables a distritos térmicos con un sistema de administración de caudal proporcional, que no solo logre obtener los beneficios de dicho sistema, sino que integre otras funciones como medición de energía térmica, comunicación y gestión de los parámetros de operación del sistema como limitación de caudal en tiempo real, entendiendo que el ODT debe invertir en el

dispositivo de medición/gestión el cual está en la conexión de cada unidad residencial y se debe comunicar con los sistemas de gestión de información del mismo ODT. Por otro lado, cada terminal debe poseer una válvula de control que responda a la señal ON/OFF que envía cada Fancoil y ajustarse en función de la carga térmica detectada, posicionando la válvula desde un controlador central que administra estas posiciones y determina las desviaciones de cada terminal, generando las acciones correspondientes. Se debe tener una válvula de control centralizada por unidad residencial para gestión del caudal necesario adecuado para lograr la temperatura de retorno de diseño. Esta solución se llamó **CONTROL HIDRÓNICO MULTIZONA (CHM)**. La idea es que el ODT adquiera el sistema de medición, válvula de control central y controlador con comunicaciones para la gestión y programación desde el centro de control del distrito térmico. Y los

usuarios o constructores adquieran las válvulas de zona que se adaptan al sistema y que reciben dos tipos de señales de control: la discreta desde los fancoils o terminales y la de posicionamiento desde el controlador central. A continuación, se realizará la descripción técnica del sistema CHM.

El equipo de ingeniería de controles de **BT CONSULTORES** implementó un prototipo de este sistema en conjunto con el fabricante de las válvulas de zona y unidad de control central, el cual lleva más de 2 años de operación continua, obteniendo el diferencial de temperatura de diseño con terminales con control ON/OFF, demostrando la efectividad del concepto y su aplicabilidad en proyectos residenciales conectados a distritos térmicos. En la figura 7 se presenta el montaje del sistema y los resultados

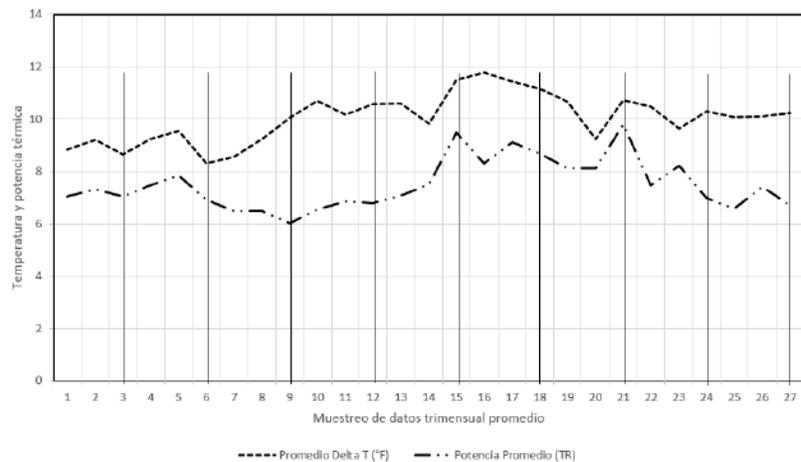


Figura 7 Montaje de sistema de control hidrónico Multizona y resultado de 9 meses de toma de datos.

Fuente: Elaboración Building Technology Consultants

5. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES

a. Conclusiones.

Las soluciones de climatización de unidades residenciales multifamiliares, conectadas a distritos térmicos se deben diseñar partiendo del concepto de control hidrónico a aplicar.

Y Un sistema de control hidrónico proporcional, reduce el CAPEX del sistema de distribución de frío hasta en un 30% y el OPEX de un Distrito térmico hasta en un 20% comparado con sistemas de control discreto.

La infraestructura de medición y gestión de datos no logra ser útil si la misma no contribuye a un efectivo control de los parámetros de operación que optimicen el uso de energía y, por ende, se traduzca en menos factores de presión sobre las tarifas de energía térmica. De manera adicional, se prevé que, a

futuro, a nivel de requerimientos del gobierno, se solicitarán sistemas de medición avanzados como los implementados en la medición de energía eléctrica (AMI - Infraestructura de medición avanzada, resolución CREG 131 de 2020).

El planteamiento del Control Hidrónico Multizona con las características descritas permite dividir las inversiones entre el operador del distrito térmico (ODT) y los usuarios de la siguiente forma:

El ODT adquiere la unidad de control y monitoreo que equivale a un medidor de energía térmica más válvulas tele comandadas para gestión de conexión y desconexión del servicio, así como su infraestructura de comunicación.

El usuario o constructor, dependiendo del modelo de negocio inmobiliario a utilizar (constructor pone los equipos o los pone el usuario después de recibido el inmueble), paga el control hidrónico de los terminales en el momento que dichos equipos se van a instalar más la red de control entre la unidad de monitoreo y control del ODT para realizar la gestión del control hidrónico de forma proporcional. Adicionalmente en este momento se realiza la integración y comisionamiento del sistema residencial al distrito térmico.

El sistema de control hidrónico Multizona, puede poseer un alto grado de digitalización al poder ser un elemento de IoT (internet de las cosas por sus siglas en inglés), permitiendo comunicación con la nube y realizando accesos a diferentes niveles de tal forma que se pueda convertir en herramienta de gestión de energía de alto nivel por parte de los usuarios y de optimización por parte del ODT.

b. Recomendaciones

Se recomienda establecer condiciones a los incentivos que se puedan dirigir hacia el desarrollo de los distritos térmicos residenciales en el sentido de evidenciar el cumplimiento de sistemas de gestión efectiva del diferencial de temperatura. Como por ejemplo acceso a créditos de la línea de eficiencia energética de Bancóldex con una porción no reembolsable por mantenimiento del diferencial de temperatura de diseño) lo cual impulsaría que las

inversiones se dirijan a sistemas de gestión efectiva de la energía térmica.

Realizar una prueba piloto de escala comercial donde se integren más de veinte unidades y se pueda realizar seguimiento a los parámetros del sistema.

NOMENCLATURA

CAPEX:	Capital Expenditure
OPEX:	Operating Expenses
PH:	Propiedad Horizontal
CAVR:	Calefacción, Aire acondicionado, Ventilación y Refrigeración
ODT:	Operador Distrito Térmico
CHM:	Control Hidrónico Multizona
CTDE:	Carga Térmica de Diseño de un Espacio
CTUR:	Carga Térmica de Diseño de una Unidad Residencial
FDCTUR:	Factor de Diversidad Carga Térmica de Diseño de una Unidad Residencial
CTRC:	Carga Térmica de Diseño de un Ramal Comunal
FDCTRC:	Factor de Diversidad Carga Térmica de Diseño de un Ramal Comunal
CTBE:	Carga Térmica Bloque de Edificio
FDCTBE:	Factor de Diversidad Carga Térmica Bloque de Edificio
QET:	Capacidad Equipo Terminal
FU:	Factor de Uso

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece de forma especial al equipo de ingeniería de Building Technology Consultants, quienes con dedicación y entrega desarrollaron y aplicaron los conceptos manifestados, en un proceso de innovación y desarrollo a lo largo de cinco años. Especialmente a los ingenieros Juan C. Urrea A. (Controles), Nancy Africano Y Nathalie Barrera (diseño sistemas HVAC), Efrain Rodriguez (modelación de energía), Schneider Loaiza y Alberto Jimenez (planeación y ejecución de la implementación del prototipo), ingenieros Sergio Marín y Sara Correa (programación e implementación sistemas de automatización) y a todo el personal de la firma.

Se agradece de forma especial a la compañía BELIMO® quien suministró las válvulas y

controladores para el sistema prototipo que operó con éxito y configuró su producto para lograr los requerimientos identificados. Especialmente al equipo de desarrollo de producto con sede en Suiza, el equipo de gerencia de producto con sede en USA y los funcionarios responsables de la región de América Latina, quienes se desplazaron varias veces a Colombia y aportaron su experiencia y conocimiento para el éxito de este desarrollo.

REFERENCIAS

- District Energy (International District Energy Association Autumn 2020)
- Andres E. Velasquez, Chief Executive Officer (2020). Step by step developing thermal energy in Colombia, District cooling comes to Colombia.
- ASHRAE Technical Committee, (2013) District Cooling guide, Atlanta GA. ASHRAE Publisher
- 3- ASHRAE Technical Committee, (2021) ASHRAE Handbook fundamentals, Atlanta GA. ASHRAE Publisher
- 4- Andres E. Velasquez (2016), DCE2 WORKSHOP. DISTRICT COOLING FOR EFFICIENT ENERGY, Medellín.
- 5- ASHRAE Technical Committee (2020) Standard 55-2020, Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, Atlanta GA, ASHRAE Publisher

Mejora de un modelo de caja gris para performance y consumo de chillers centrífugos en plantas de agua fría

Blanca L. Foliaco^{1*}; Antonio Bula²

¹*bfoliaco@uninorte.edu.co*; ²*rerangel@uninorte.edu.co*

RESUMEN

Los modelos de caja gris o semiempíricos permiten evaluar el desempeño de equipos enfriadores de agua por medio de variables fácilmente medibles en una instalación, al mismo tiempo que sus parámetros tienen significado físico dentro de la operación del equipo. En este trabajo se propone una modificación al modelo fundamental de Gordon (GNU) basado en el consumo de potencia y eficiencia en función de las temperaturas de entrada y la carga de refrigeración, manteniendo los mismos parámetros originales del GNU y se ha comparado con las modificaciones propuestas por Jiang y Reddy. Usando un banco de datos de varios meses distintos de un año de operación de un chiller de 550 TR ubicado en el distrito térmico de la Universidad del Norte (Barranquilla), se pudo establecer la frecuencia de cargas de refrigeración, dividida en dos regímenes, a altas cargas y bajas cargas como dos zonas de operación diferenciadas. Mediante una rutina de programación, se realizó el filtrado de los datos y el ajuste de cada modelo por medio de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados, comparando su capacidad de predicción. El modelo modificado en función del consumo presenta la mayor precisión y robustez para el tipo de chiller estudiado, con valores menores para el error (CV < 5%) y R² mayor a 85%. Por medio del modelo desarrollado se puede lograr una predicción del consumo cuando no están disponibles todos los datos y del desempeño al variar las temperaturas de entrada del agua y la carga de refrigeración.

ABSTRACT

Grey or semi-empirical box models allow the performance of water chiller equipment to be evaluated employing easily measurable variables in a facility. At the same time, their parameters have physical significance within the operation of the equipment. This paper proposes a modification to Gordon's fundamental model (GNU) based on power consumption and efficiency as a function of input temperatures and cooling load, maintaining the same original GNU parameters. Besides, it has been compared to the modifications proposed by Jiang & Reddy. Through a database of several months in one year of operation 550TR chiller located in the Universidad del Norte (Barranquilla) thermal district, it was possible to establish the frequency of cooling loads, divided into two regimes, at high loads and low loads as two differentiated operating zones. Using a programming routine, the filtering of the data and the adjustment of each model employing linear regression by the least-squares method was carried out, comparing its predictive capacity.

¹ Estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica; Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. *bfoliaco@uninorte.edu.co*

² Profesor, Dpto. de Ingeniería Mecánica; Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia; *rerangel@uninorte.edu.co*

The modified model, according to consumption, presents the highest precision and robustness for the type of chiller studied, with lower values for error ($CV < 5\%$) and R^2 more significant than 85%. A prediction of consumption and performance can be achieved by employing the developed model when little data is available, by varying the inlet temperatures of the water and the cooling load.

Palabras Clave

Chiller, COP, modelo, consumo

INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo se ha dedicado un gran esfuerzo al modelado de equipos de generación de agua helada, específicamente, en los llamados comúnmente chillers, con fines de diseño, optimización y/o control. Este campo de investigación es relevante ya que la optimización de dichos equipos se traduce en ahorros de energía, y por tanto, en un ahorro económico y ambientalmente sostenible, por ser los chillers grandes consumidores de energía eléctrica, sobre todo en edificios residenciales (W. Kim & Katipamula, 2018).

Convencionalmente, los modelos de equipos de refrigeración pueden ser de dos tipos: físicos y empíricos. Los modelos físicos están basados en las leyes de conservación y pueden entregar información completa del comportamiento de un sistema, en estado dinámico y estable. Sin embargo, pueden ser complejos, requerir altos recursos computacionales y requerir información del equipo que no es accesible. Por otro lado, los modelos empíricos (o de caja negra) se basan en datos experimentales (y accesibles) (Kadam et al., 2020), por lo cual son apropiados para la optimización, control, detección y diagnóstico de fallas (Goyal et al., 2019; Ho & Yu, 2021). Los parámetros de estos modelos no tienen ningún significado físico y deben ser ajustados de acuerdo con los datos de operación, lo cual es una limitante cuando se quiere extrapolar el modelo a otro rango de operación. Para superar estas desventajas, se han desarrollado nuevos modelos con técnicas avanzadas de redes neuronales y ciencia de datos, algunas veces muy complejas (I. Kim & Kim, 2021; J. H. Kim et al., 2019).

Otra opción son los modelos de caja gris, los cuales están basados en datos fácilmente medibles en una planta de agua fría y sus parámetros tiene un

significado físico, lo cual los hace apropiados para evaluar y optimizar el desempeño de un equipo y al mismo tiempo monitorear su operación.

Desde hace muchos años se han desarrollado varios modelos empíricos y semiempíricos para equipos enfriadores de agua. En su trabajo de 1994, Beyene (Beyene et al., 1994) utilizó el software para comparar el desempeño de varios tipos de chillers contrastando también con datos de campo. Ng desarrolló un modelo termodinámico para cada uno de los regímenes de carga de operación del equipo (Ng et al., 1994). Este último autor, junto a Gordon y Chua, publicaron una gran cantidad de artículos sobre modelos cuasi empíricos para varios tipos de chillers, hasta llegar al que sería llamado el Modelo Fundamental de Gordon- Ng (GNU), un modelo semiempírico cuyos parámetros tienen significado físico para cualquier tipo de chiller (Gordon et al., 1995; Gordon & Ng, 2008; Ng et al., 1997). El Modelo Fundamental de Gordon-Ng arrojó resultados de gran precisión al predecir valores del COP, por eso ha sido objeto de varios estudios tendientes a optimizar el modelo o estimar los parámetros de este con métodos más eficaces que la regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados. Reddy y Andersen han estudiado nuevos métodos de estimar dichos parámetros, mediante el método de Error In Variables (EIV) (Andersen & Reddy, 2011; Reddy & Andersen, 2002), encontrando valores más precisos siempre y cuando el objetivo del modelo sea la estimación de parámetros físicos y no el diagnóstico, en cuyo caso es más eficaz el método tradicional de mínimos cuadrados. Siguiendo esta línea de investigación, Acerbi (Acerbi & De Nicolao, 2018) estudió la posibilidad de utilizar Mínimos cuadrados No Lineales en la regresión utilizando los datos experimentales publicados por Chua (1997) en su estudio original, comparando también con el método de EIV, encontrando que, aunque ambos métodos

pueden mejorar la precisión de la estimación, no ofrecen una ventaja significativa cuando el objetivo es predecir el COP del chiller. Jiang y Reddy también realizaron una reevaluación del Modelo Gordon-Ng bajo diferentes condiciones de operación y comparando con un modelo modificado llamado Modelo Cuasi empírico, para distintos tipos de chiller (Jiang, 2003), encontrando mejor precisión en el Gordon-Ng. Saththasivam (Saththasivam & Ng, 2008) evaluó el Modelo de forma parecida, en tres chillers centrífugos sometidos a diferentes tipos de falla, estimando los tres parámetros del modelo para cada caso y encontrando suficiente precisión para utilizar dos de los parámetros como base para diagnóstico (Saththasivam & Ng, 2008). Recientemente, se han propuesto variaciones del Modelo Fundamental, basado en el consumo, con fines de control y optimización en una planta de agua fría (Zhao et al., 2021) y en predicción del desempeño en chillers centrífugos (Foliaco et al., 2020).

A lo largo de los años, el Modelo Fundamental ha sido objeto de comparaciones con otros modelos semiempíricos y empíricos, tal es el caso de los trabajos realizados por Hydeman (2002), Swider (2003) y Lee (2010). El primero encontró mejor precisión en un modelo DOE2 modificado para chillers centrífugos con velocidad fija y variable, a cargas parciales y máximas (Hydeman et al., 2002). El segundo autor comparó el Modelo Fundamental con otros modelos empíricos y métodos basados en redes neuronales, encontrando mejor predicción con estos últimos, siempre y cuando se cuente con una gran cantidad de datos, lo cual no siempre es el caso (Swider, 2003). Por su parte, Lee, encontró valores más precisos en los modelos empíricos, llamado Bicuadrado y Polinomial multivariado (Lee & Lu, 2010). Recientemente, H. Wang realizó una comparación entre modelos empíricos, incluyendo el Gordon-Ng, encontrando buenos valores de ajuste para su propio modelo, llamado Modelo de Wang, aplicado a chillers centrífugos, trabajando en serie; En el mismo año, el mismo autor desarrolló un nuevo modelo empírico basado en el consumo eléctrico y comparó con otros modelos de consumo de potencia (H. Wang, 2017a, 2017b). Y. Wang (2018) propuso otro modelo empírico para predecir el consumo (Y. Wang et al., 2018), a partir del “Modelo cuadrático”

(Braun, 1988) aplicado a sistemas multi chiller para evaluar su desempeño. Por último, Zhang (Zhang et al., 2021) comparó ocho modelos empíricos diferentes para investigar su aplicación en varios tipos de chiller, usando datos de laboratorio y datos reales de operación, encontrando que los modelos pueden tener baja precisión con datos de operación en campo, por lo cual se hace preciso seguir investigando en la mejora de los modelos empíricos.

Este trabajo continúa con las últimas investigaciones en modelos basados en el consumo, modificando el modelo fundamental original de Gordon-Ng, pero conservando sus parámetros iniciales. Utilizando una base de datos correspondiente a dos meses del año 2018, proveniente de un chiller centrífugo de 550 TR, se analizaron los datos construyendo un algoritmo para la gestión, filtrado y estimación de parámetros del modelo por regresión lineal múltiple, usando el método de mínimos cuadrados.

1. MODELOS SEMIEMPÍRICOS

1.1. Modelo Fundamental de Gordon (GNU)

El modelo fundamental de Gordon- Ng (Gordon et al., 1995; Gordon & Ng, 1995; Ng et al., 1997) está basado en las leyes de la Termodinámica y aplica para varios tipos de chillers, consta de tres parámetros y tiene la siguiente forma:

$$\left(\frac{1}{COP} + 1\right) \frac{T_{chi}}{T_{ci}} - 1 = b_1 \frac{T_{chi}}{Q_{ev}} + b_2 \frac{(T_{ci} - T_{chi})}{T_{ci} Q_{ev}} + b_3 \frac{(1/COP + 1)}{T_{ci}} Q \quad [1]$$

Donde b_1 , b_2 y b_3 , tienen significado físico, a saber:

$b_1 = S$ (Producción de entropía)

$b_2 = Q_{leak}$ (Pérdidas o ganancias térmicas con el ambiente)

$b_3 = R$ (Resistencia térmica de los intercambiadores)

1.2. Modelo GNU modificado de Jiang & Reddy (2002)

Con el propósito de obtener mayor precisión debido a los cambios de flujo del refrigerante, estos autores (Jiang, 2003) propusieron la siguiente modificación al modelo original:

$$\left(\frac{1}{COP} + 1\right) \frac{T_{cho}}{T_{ci}} - 1 = \left(b_1 + b_2 \frac{Q_{ev}}{Q_{ev,max}}\right) \frac{T_{cho}}{Q_{ev}} + b_3 \frac{(T_{ci} - T_{cho})}{T_{ci} Q_{ev}} + b_4 \frac{(1/COP + 1)}{T_{ci}} Q_{ev} \quad [2]$$

Donde: $Q_{ev, max}$ es la carga de refrigeración nominal del equipo.

1.3. Modelo GNU modificado con base en la potencia (2020)

Aplicando principios de Termodinámica y transferencia de calor (Foliaco et al., 2020) se puede modificar el modelo de Gordon para obtener una ecuación basada en el consumo de energía, manteniendo los mismos parámetros con significado físico de la ecuación 1. Así se obtiene:

$$W_{com} = b_1 T_{c,i} + b_2 \left(\frac{T_{c,i} - T_{ch,i}}{T_{ch,i}}\right) + b_3 \frac{Q_{ev}^2}{T_{ch,i}} \left(1 + \frac{W_{com}}{Q_{ev}}\right) + Q_{ev} \left(\frac{T_{c,i} - T_{ch,i}}{T_{ch,i}}\right) \quad [3]$$

2. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

La base de datos corresponde a los meses de febrero, julio y septiembre del 2018, de un chiller de 550 TR marca York®, en la cual se encuentra información fácilmente asequible, medida por un conjunto de sensores y gestionada por un controlador Modbus. El chiller opera con un sistema primario constante-secundario variable y extrae la carga térmica del edificio de Ingenierías de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia. La carga de refrigeración Q_{ev} , se puede calcular a partir del caudal de agua en el evaporador y las temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento (Figura 1). La tabla 2 muestra los rangos de datos almacenados entre julio y septiembre de 2018

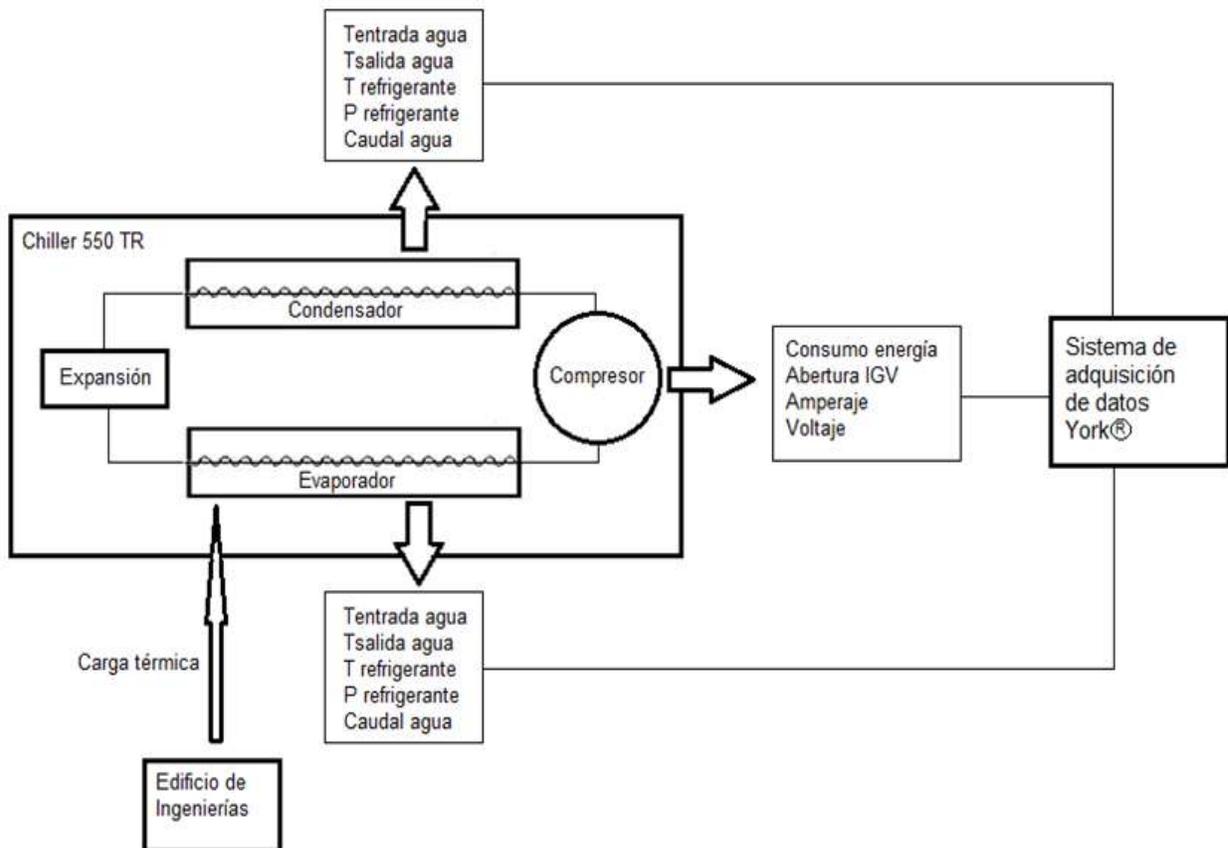


Figura 1. Diagrama de recolección de datos para el chiller centrífugo de 550 TR.

El sistema calcula la energía consumida en intervalos de 10 minutos, por lo tanto, la potencia consumida es un promedio para ese intervalo de tiempo, asumiendo que el sistema permanece en estado estable en dicho margen de tiempo. Para asegurar puntos de estado estable se realiza un filtrado de datos que no varíen entre si más de un 5%. En la Figura 2, se puede observar el flujo del algoritmo desarrollado: se realiza un primer filtro de datos erróneos y faltantes. Se calcula el radio de carga y las eficiencias, COP y kW/TR. Se hace un segundo filtro de datos que no corresponden a estado estable y un tercer filtro de datos que supongan violaciones a las

leyes de la termodinámica, eficiencias mayores a uno y consumos que no corresponden a operación normal. Con la matriz que queda, se realiza una regresión lineal múltiple por el método de aproximación por Mínimos Cuadrados y se calculan los parámetros, los intervalos de confianza y las métricas. Estas han sido usadas por previos autores para comparar que tanto ajustan los modelos a las observaciones desde el punto de vista estadístico. En este trabajo se usaron el Coeficiente de Determinación (R^2), el Coeficiente de Determinación Ajustado (R^2_{adj}), el RMSE y CV (Jia & Reddy, 2003).

Tabla 1. Métricas de regresión para los modelos comparados para los datos promedio meses de julio y septiembre.

	Septiembre				Julio			
	$T_{cho}, ^\circ C$	$T_{ci}, ^\circ C$	W, kW	Q_{ev}, kW	$T_{cho}, ^\circ C$	$T_{ci}, ^\circ C$	W, kW	Q_{ev}, kW
Promedio	7.17	28.41	211.03	1119.80	6.90	27.48	186.53	1083.38
Desviación estándar	0.73	1.47	66.56	417.36	0.54	1.25	58.62	421.28
Máximo	8.84	31.39	330.00	1847.40	8.84	30.00	330.00	1957.15
Mínimo	6.28	24.06	89.10	310.95	5.11	24.67	79.2	310.95

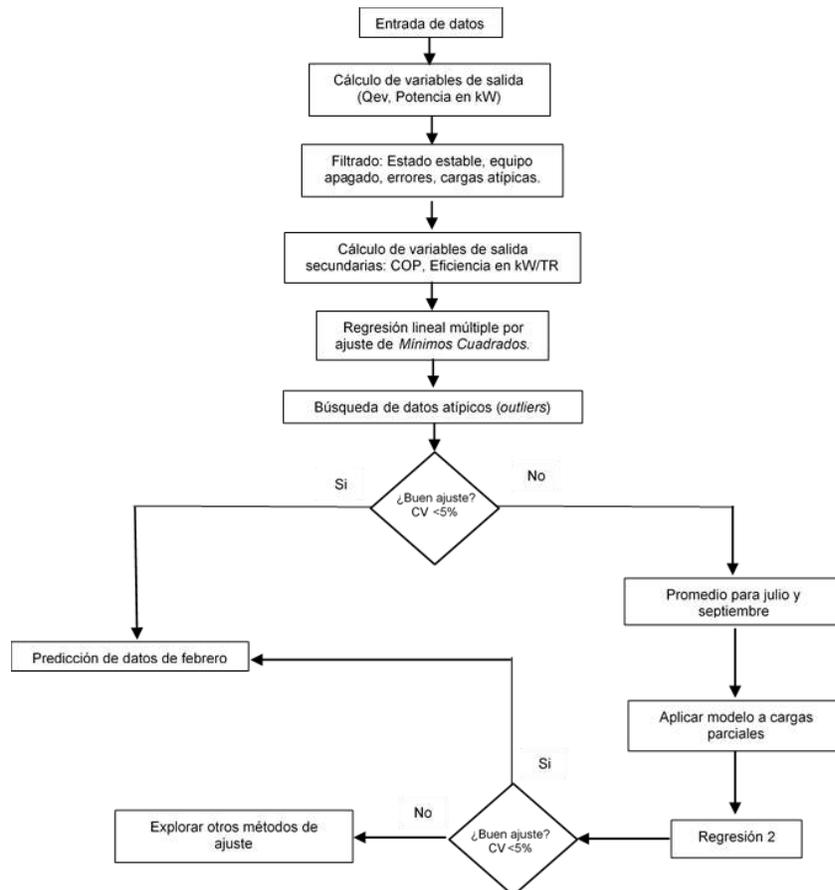


Figura 2. Flujo del algoritmo para todo el proceso de análisis y comparación.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Para los meses de julio y septiembre se obtuvo un total de 4464 y 4320, respectivamente, que al final del tercer filtrado se convirtieron en 2938 y 3303 puntos. Para estos, se obtuvo un histograma de cargas de operación del chiller y el perfil de carga, figura 3 y figura 4. Para el total de 6706 datos se graficó la potencia, el Coeficiente de Desempeño COP y la eficiencia en kW/TR respecto a la carga con respecto a la carga máxima del chiller. Con estos gráficos se pudo analizar el comportamiento del equipo y la variación entre las variables mencionadas. Estos puntos fueron filtrados para cargas entre 0.15 y 0.95, ya que fuera de este rango el equipo estaba apagado, o constituían datos atípicos.

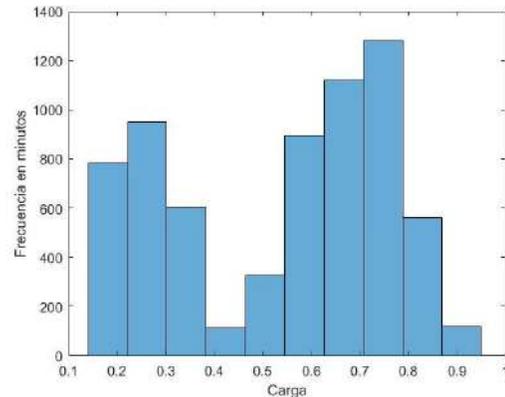


Figura 3. Frecuencia de cargas para los meses de julio y septiembre.

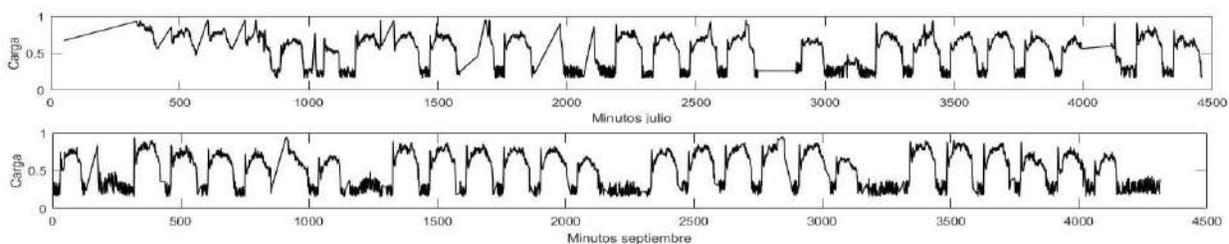


Figura 4. Perfil de carga para los meses de julio y septiembre.

En la figura 5 se puede apreciar la variación de la carga de enfriamiento con el COP, la cual muestra un comportamiento acorde a lo esperado, no hay una relación lineal entre la carga y el COP a bajos valores, pero a cargas altas el COP tiene a subir o mantenerse estable, observando además un punto de COP máximo a cargas parciales. En la figura 5 se observa una gráfica del consumo en kW contra la carga de refrigeración, que presenta una tendencia lineal, obteniéndose mayor consumo a mayor requerimiento de carga. No se obtiene la misma relación para las eficiencias, como se verá posteriormente.

Observando el histograma de la figura 3 se puede apreciar dos distribuciones diferentes, una a cargas bajas de 0.2 a 0.4, y otra a cargas parciales y altas, de 0.5 a 0.9. El equipo en los meses analizados no llegó a su carga máxima. A cargas altas y parciales el COP y kW/TR son altos, mostrando un pico, a partir del cual

la eficiencia desciende de forma aproximadamente lineal con la carga de enfriamiento. Para visualizar mejor que sucede con la eficiencia en varios rangos de carga, se graficaron ambas variables para una semana de operación para cualquier mes (Figura 6).

Se aprecia que a cargas altas y parciales la eficiencia se mantiene estable y cercana al valor de diseño del fabricante, el cual es 0.52 y al valor nominal de 0.6. Esto indica que el equipo presenta un funcionamiento óptimo, ya que el chiller centrífugo fue diseñado para operar eficientemente a cargas parciales y dinámicas. Sin embargo, a bajas cargas, la eficiencia decae hasta uno o más. De acuerdo con la teoría, (Gordon et al., 1995; Gordon & Ng, 1995; Ng et al., 1994) eso es debido a la generación de entropía por la acción de las paletas de pre-rotación (Inlet Guide Vanes, IGV), la presencia de un variador de velocidad (Hsu & Wang, 2021) (VSD) y a las pérdidas por fricción por el flujo en los intercambiadores.

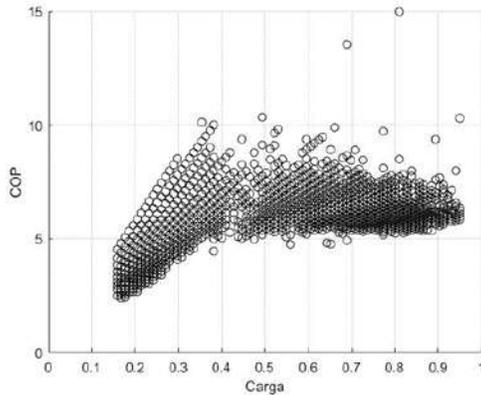


Figura 5 (a)

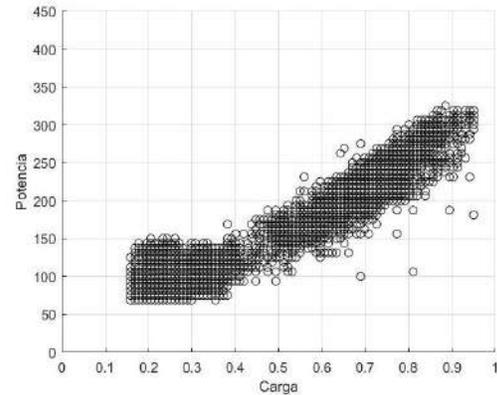


Figura 5 (b)

Figura 5. Gráficas de la carga de refrigeración contra el COP y potencia para julio y septiembre.

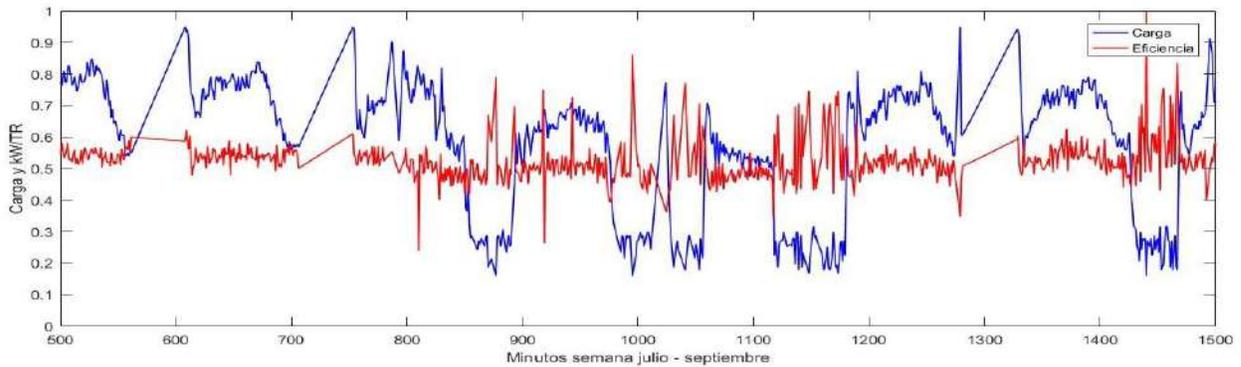


Figura 6. Perfil de carga y kW/TR para una semana entre julio y septiembre.

En base a esta información, se construyó un algoritmo para calcular los valores promedio para ambos meses y se realizó una regresión lineal para los tres modelos. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 2. Se observa un incremento de los valores de R^2 y R^2 ajustada y un CV aceptable para el objetivo de predicción, aunque el valor es similar al %CV para el Modelo GNU fundamental, las métricas de R^2 para este último son bajas en comparación con el modelo propuesto. En la figura 7 se muestra el ajuste de los tres modelos y su capacidad de predicción. Con el modelo obtenido se predijo el consumo eléctrico para el mes de febrero de 2018, del cual se posee un banco de datos similar. A partir de la figura 8 se puede concluir que, aunque la potencia de predicción del modelo propuesto de Gordon-Ng modificado basado en el consumo ofrece un ajuste aceptable a cargas parciales, a cargas menores tiende a sobreestimar los valores de potencia, justo a las horas de cargas

bajas correspondientes a la madrugada y altas horas de la noche, como se observó en los perfiles de carga.

Tabla 2. Métricas de regresión para los modelos comparados para los datos promedio meses de julio y septiembre.

Modelo	R^2	R^2 ajustada	RMSE	%CV
GNU Fundamental	0,37	0,35	0,00	4,73
GNU mod Reddy	0,27	0,24	0,00	5,74
GNU modificado	0,86	0,86	5,05	4,68

El modelo propuesto arroja valores muy cercanos al Modelo Fundamental GNU, con valores menores de error, según las métricas de la tabla 1. Hay que recordar que los modelos de base empírica son aplicables al rango de datos del cual se obtuvo, por lo tanto, es necesario analizar periodos distintos del año. También hay que tener en cuenta que entre los

meses de febrero y julio – septiembre hay diferencias en los requerimientos de carga y en las condiciones ambientales. El modelo modificado de Jiang - Reddy tiende a subestimar los valores de consumo, aunque sería necesario realizar una validación con otro tipo de chiller u otros datos; Sin embargo, no es ese el alcance de este estudio.

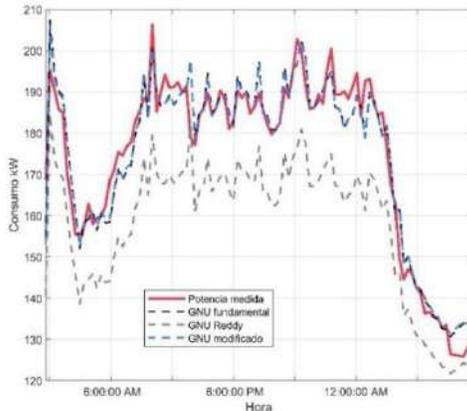


Figura 7. Comparación entre la capacidad de predicción de los modelos para datos promedio de julio y septiembre

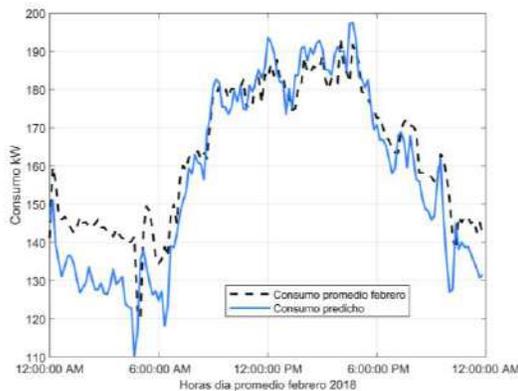


Figura 8. Capacidad de predicción del modelo GNU modificado basado en el consumo para el mes de febrero de 2018.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado diversos métodos para la evaluación, predicción, diagnóstico y optimización de chillers centrífugos. Tradicionalmente, los modelos se clasifican en: modelos físicos, empíricos y cuasi empírico. Este

estudio se ha limitado a los modelos cuasi empíricos debido a la necesidad de evaluar el funcionamiento de un chiller con datos fácilmente medibles en campo y al mismo tiempo optimizar y monitorear su operación. También se ha limitado el estudio a chillers centrífugos enfriados por agua, con velocidad variable y flujo primario constante, debido a la disponibilidad de datos. Según los resultados obtenidos, susceptible a mejoras del modelo como trabajo en progreso, es factible utilizar el Modelo Gordon – Ng modificado en función del consumo para estimar los parámetros físicos y el valor del consumo siempre y cuando se mantenga el rango de operación usado en esta investigación. También es necesario y aconsejable validar los valores de los parámetros con valores medidos físicamente o simulados en estado estable. Se realizará mayor investigación en el modelado de chillers centrífugos en estado transitorio para obtener valores más precisos de consumo.

NOMENCLATURA

SIGLAS

COP	Coficiente de desempeño (Coefficient of performance)
CV	Coficiente de variación
GNU	Fundamental Gordon – Ng model
RMSE	Error cuadrático medio
IGV	Paletas de prerrotación (Inlet Guide Vane control)
TR	Toneladas de refrigeración

SÍMBOLOS

T	Temperatura, °C
Q	Carga de refrigeración/calor transferido, kW
R	Resistencia térmica, K/kW
S	Entropía, kW/K
ev	Evaporador
W	Potencia consumida, kW
c	Agua en el condensador
ch	Agua en el evaporador
i	Entrada (inlet)
o	Salida (oulet)

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Norte y Colciencias a través de la Convocatoria Doctorados Nacionales 727/757 del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología e Innovación FCTeI del Sistema General de Regalías SGR por apoyar esta investigación.

REFERENCIAS

- Acerbi, F., & De Nicolao, G. (2018). Identification of the Gordon-Ng Chiller Model: Linear or Nonlinear Least Squares? *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2018-Sept*, 1314–1321.
- Andersen, K., & Reddy, T. A. (2011). The Error in Variables (EIV) Regression Approach as a Means of Identifying Unbiased Physical Parameter Estimates: Application to Chiller Performance Data. *HVAC&R Research*, 8(3), 295–309.
- Beyene, A., Guven, H., Jawdat, Z., & Lowrey, P. (1994). Conventional chiller performances simulation and field data. *International Journal of Energy Research*, 18(3), 391–399.
- Braun, J. E. (1988). *Methodologies for the design and control of central cooling plants*.
- Foliaco, B., Bula, A., & Coombes, P. (2020). Improving the Gordon-Ng model and analyzing thermodynamic parameters to evaluate performance in a water-cooled centrifugal chiller. *Energies*, 13(9).
- Gordon, J., Ng, K. C., & Chua, H. T. (1995). Centrifugal chillers: Thermodynamic modelling and a diagnostic case study. *International Journal of Refrigeration*, 18(4), 253–257.
- Gordon, J. M., & Ng, K. C. (1995). Predictive and diagnostic aspects of a universal thermodynamic model for chillers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(5), 807–818.
- Gordon, J. M., & Ng, K. C. (2008). *Cool thermodynamics*. Viva Books.
- Goyal, A., Staedter, M. A., & Garimella, S. (2019). A review of control methodologies for vapor compression and absorption heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 97, 1–20.
- Ho, W. T., & Yu, F. W. (2021). Improved model and optimization for the energy performance of chiller system with diverse component staging. *Energy*, 217, 119376.
- Hsu, C. N., & Wang, S. H. (2021). Evaluating the performance of water chillers equipped with constant-or variable-frequency centrifugal compressors. *Processes*, 9(6).
- Hydeman, M., Webb, N., Sreedharan, P., & Blanc, S. (2002). Development and testing of a reformulated regression-based electric chiller model. *ASHRAE Transactions*, 108 PART 2, 1118–1127.
- Jia, Y., & Reddy, T. A. (2003). Characteristic Physical Parameter Approach to Modeling Chillers Suitable for Fault Detection, Diagnosis, and Evaluation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125(3), 258–265.
- Jiang, W. T. A. R. (2003). Reevaluation of the Gordon-Ng performance models for water-cooled chillers. *ASHRAE Transactions*, 109 PART 2, 272–287.
- Kadam, S. T., Hassan, I., Rahman, M. A., Papadopoulos, A. I., & Seferlis, P. (2020). Review on Modeling of Vapor Compression Chillers: District Cooling Perspective. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 28(02), 2030003.
- Kim, I., & Kim, W. (2021). Development and validation of a data-driven fault detection and diagnosis system for chillers using machine learning algorithms. *Energies*, 14(7).
- Kim, J. H., Seong, N. C., & Choi, W. (2019). Modeling and optimizing a chiller system using a machine learning algorithm. *Energies*, 12(15).
- Kim, W., & Katipamula, S. (2018). A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(1), 3–21.
- Lee, T. S., & Lu, W. C. (2010). An evaluation of empirically-based models for predicting energy performance of vapor-compression water chillers. *Applied Energy*, 87(11), 3486–3493.
- Ng, K. C., Bong, T. Y., & Chua, H. T. (1994). Performance Evaluation of Centrifugal Chillers in an Air-Conditioning Plant with The Building Automation System (BAS). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 208(4), 249–255.
- Ng, K. C., Chua, H. T., Ong, W., Lee, S. S., & Gordon, J. M. (1997). Diagnostics and optimization of reciprocating chillers: theory and experiment. *Applied Thermal Engineering*, 17(3), 263–276.
- Reddy, T. A., & Andersen, K. K. (2002). An evaluation of classical steady-state off-line linear parameter estimation methods applied to chiller performance data. *HVAC and R Research*, 8(1), 101–124.
- Saththasivam, J., & Ng, K. C. (2008). Predictive and diagnostic methods for centrifugal chillers. *ASHRAE Transactions*, 114 PART 1(4), 282–287.
- Swider, D. J. (2003). A comparison of empirically based steady-state models for vapor-compression liquid chillers. *Applied Thermal Engineering*, 23(5), 539–556.
- Wang, H. (2017a). Empirical model for evaluating power consumption of centrifugal chillers. *Energy and Buildings*, 140, 359–370.
- Wang, H. (2017b). A steady-state empirical model for evaluating energy efficient performance of centrifugal water chillers. *Energy and Buildings*, 154, 415–429.
- Wang, Y., Jin, X., Du, Z., & Zhu, X. (2018). Evaluation of operation performance of a multi-chiller system using a data-based chiller model. *Energy and Buildings*, 172, 1–9.
- Zhang, B., You, S., Wang, S., Ding, X., Wang, C., & Gao, Y. (2021). From laboratory to on-site operation: Reevaluation of empirically based electric water chiller models. *Building Simulation*.
- Zhao, T., Wang, J., Fu, P., & Wu, X. (2021). Study on simplified energy-efficient control methods of HVAC cooling water system from the global online optimization perspective. *Energy Science & Engineering*, 9(4), 464–482.

Distrito Térmico Centro Empresarial y de Negocios Potenza

César Augusto Millán Martínez^{1*}; Jorge Arnulfo Rico Patiño²;
Manuel Alejandro Posada Aguilera³; Francisco Alexander Navas Torres⁴
Daniel Felipe López Acosta⁵

¹camillan@grupodellano.com; ²jarico@grupodellano.com; ³mposada@grupodellano.com;

⁴fanavas@grupodellano.com; ⁵dflopez@grupodellano.com

RESUMEN

Llanogas desarrolla un Distrito Térmico con capacidad de entrega de hasta 516 TR. Conformado por un tanque de almacenamiento térmico del tipo estratificado de capacidad 1500 TR-h que garantiza una producción de energía constante y eficiente, de manera que el factor de planta pueda mantenerse en un valor de 62% al mejor punto de operación, dos chillers eléctricos con capacidad de producción de 117,8 TR c/u y un chiller de absorción de 178 TR operando con ethylene-glycol.

Por las características de diseño se utilizará agua como refrigerante, a fin de no generar un impacto ambiental en el proceso de enfriamiento. Este sistema dispone de equipos de medición y control integrados a través de un sistema centralizado. También dispone de bombas de recirculación de agua fría para el circuito primario, bombas de recirculación del agua de condensación y torres de enfriamiento para los chillers. El agua de reposición de estas últimas es suministrada por el recurso hídrico subterráneo mediante un sistema de pozo profundo, integrando fuentes renovables al sistema.

La energía eléctrica requerida por la planta de agua helada y el 65% del requerimiento eléctrico del Centro Empresarial y de Negocios Potenza es producido por microturbinas que funcionan a base de gas natural, con una capacidad instalada de 328 kWe. El calor residual proveniente de las microturbinas alimenta el chiller de absorción, garantizando la cogeneración de energía a partir de un energético primario

ABSTRACT

Llanogas develops a Thermal District with a maximum delivery capacity of 300 TR. It includes a thermal storage tank of the stratified type with a capacity of 1000 TR-h that guarantees a constant and efficient energy production, so that the plant factor can be maintained at a value of 62% at the best operating point, an electric chiller with a production capacity of 120 TR and an absorption chiller with a capacity of 178 TR.

¹ Subgerente Técnico* Gases del Llano S.A. E.S.P., Villavicencio, Colombia; camillan@grupodellano.com

² Prof. Líder I Ingeniería & Mantenimiento; Gases del Llano S.A. E.S.P., Villavicencio, Colombia

³ Prof. Líder II Mantenimiento; Gases del Llano S.A. E.S.P., Villavicencio, Colombia

⁴ Líder Corp. Investigación y Desarrollo; Gases del Llano S.A. E.S.P., Villavicencio, Colombia

⁵ Prof. Líder II Ingeniería; Gases del Llano S.A. E.S.P., Villavicencio, Colombia

Due to the design characteristics, water is used as the refrigerant, so as not to generate an environmental impact in the cooling process. The cooling plant has integrated measurement and control systems through a centralized system. It also has chilled water recirculation pumps for the primary circuit, condensation water recirculation pumps, and cooling towers. The make-up water for the cooling towers is supplied by groundwater resources through a deep well system, integrating renewable sources into the system.

The electrical energy required by the Thermal District and 65% of the electrical requirements of the Potenza Business Center is produced by natural gas-fired microturbines, with an installed capacity of 328 kW. The residual heat from the microturbines feeds the absorption chiller, making the cogeneration of energy process from a primary energy source.

This project contributes to the sustainable development of the city, centralizing energy production in an efficient and low-emission way.

Palabras Clave:

Distrito térmico, almacenamiento térmico, aprovechamiento de fuentes renovables, cogeneración, desarrollo sostenible.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de los fenómenos climáticos y la crisis ambiental que han golpeado al planeta en los últimos años han dejado hoy, más claro que nunca, que se necesita el compromiso de todos para reducir el impacto contaminante y contrarrestar los daños ocasionados por viejos paradigmas productivos, de consumo y de la planificación urbana.

En Colombia la promoción de Distritos Térmicos, se ha convertido en una opción tecnológica para el desarrollo de entornos y servicios sostenibles para la climatización de ciudades. Esta es una oportunidad de repensar las urbes colombianas con una visión de sostenibilidad, eficiencia energética y bajo impacto ambiental, lo cual sin duda, sintetiza los elementos que los han situado a nivel mundial como una prioridad en la nueva forma de entender la planificación urbana.

En Villavicencio, el Distrito Térmico está enfocado principalmente en el enfriamiento de un edificio denominado Centro Empresarial y de Negocios Potenza, cliente ancla del proyecto luego de ser seleccionado por Llanogas como un potencial para desarrollar este tipo de proyectos en cooperación con ONUDI.

Se trata de una innovadora alternativa de infraestructura para poder producir frío, de manera centralizada, y distribuir esta forma de energía mediante redes a múltiples usuarios y edificaciones agrupadas, en entornos urbanos como sectores industriales y comerciales. Es, por tanto, una tecnología diseñada para sustituir los sistemas que funcionan con Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SAO) y que generan un alto impacto ambiental.

De esta manera se aporta y se logra la articulación para contribuir a los compromisos del cambio climático y a la meta de ahorro energético a mediano plazo en Colombia, con la convicción de ser un proyecto clave para las ciudades sostenibles.

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El proyecto centro empresarial y de negocios Potenza es un proyecto de construcción de 26.000 m² construidos de tipo institucional el cual está ubicado en la Calle 34A No. 34 – 29 del Barrio Barzal de la ciudad de Villavicencio, Meta, en el corazón comercial y empresarial de la ciudad.

Es un edificio de 10 pisos cuyo uso principal será de oficinas, conformado por 3 niveles de sótanos que ocupan el 100% del área del lote donde se alojan cuartos técnicos hidráulicos, eléctricos y de

ventilación, una plataforma comercial distribuida en 2 niveles (Locales comerciales) así como el lobby general de acceso peatonal acompañado por una plazuela de islas comerciales. A partir del nivel denominado Piso 2 el proyecto se divide en dos torres interconectadas por un punto fijo de circulación vertical compuesto por 4 elevadores y una escalera, la Torre 1 se encuentra a la izquierda del proyecto la cual será ocupada por el grupo de empresas denominado Grupo de llano (Nivel piso 2 - Nivel Piso 7), y la Torre 2 correspondiente al costado derecho del proyecto son oficinas independientes las cuales están siendo comercializadas a clientes externos. A partir del nivel correspondiente al Piso 8 se encuentra un área de terraza verde común a la copropiedad y un auditorio para 500 personas de propiedad de los

inversionistas. En la cubierta de dicho auditorio correspondiente al nivel Piso 10 de la Torre 1 se dispone de un área para ubicación de equipos técnicos del Distrito Térmico acompañado por un área de cubierta verde.

De allí, se está ejecutando un proyecto de Distrito Térmico para la ciudad de Villavicencio (Meta), partiendo del diseño del cliente ancla como lo es el CEN Potenza para configurar técnicamente una planta de generación térmica confiable y eficiente, buscando optimización de recursos de inversión, eficiencia energética, impacto ambiental y buscando un sistema sostenible que atienda las necesidades presentes y futuras del proyecto de acuerdo a la aplicación y horarios de operación descritos en la tabla 1 a continuación:



Figura 1: Centro Empresarial y de Negocios Potenza

Tabla 1: Datos del Proyecto Inmobiliario

	TORRE 1	TORRE 2
Pisos	Diez (10)	Siete (7)
Área [m ²]	19.000	5.000
Aplicación	Oficinas	Oficinas y Zonas Comerciales
Horarios de Operación*	Lunes a viernes 07:00 a 19:00	Lunes a Domingos 07:00 a 21:00 07:00 a 16:00
Energéticos	Energía Eléctrica y Acondicionamiento del Aire	

Fuente Propia

1.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

En general la inversión inicial del proyecto incluye el desarrollo de una planta de Generación de Energía Térmica con una capacidad de entrega de hasta 516 TR cuando opera con un diferencial de temperatura de Agua Helada de 11,1°C. El módulo que se construirá estará conformado por un tanque de almacenamiento térmico del tipo estratificado, un equipo de enfriamiento de agua (chiller) eléctrico y un equipo del tipo absorción, este último funcionará a partir de calor indirecto, manejando así fuentes energéticas de diferente tipo, que garantizan altas eficiencias de operación. Este módulo también dispondrá de las baterías de bombas de recirculación de agua fría para el circuito primario,

las baterías de bombas de recirculación del agua de condensación y las torres de enfriamiento para el chiller eléctrico y de absorción, así como todo el equipo de protección, medición y control integrado a través de un sistema centralizado que se describe a continuación:

1.1.1. MICROTURBINA

La totalidad de la energía eléctrica requerida para la producción y distribución térmica será originada por un generador que funciona a base de gas (una microturbina); este generador, contiene inicialmente 1 módulo de microturbina C200, nominalmente con producción de 00 kWe, el cual entrega hasta 328 kWe, considerando las pérdidas de eficiencia generadas por la altura sobre el nivel del mar de la

ubicación del proyecto, temperatura exterior y composición (cromatografía) del combustible disponible para suministro al equipo.

1.1.2. CHILLER DE ABSORCIÓN

Los enfriadores de líquido por absorción utilizan calor residual para conducir el ciclo de refrigeración. Este calor es generado por los gases de escape de la microturbina y entregados al chiller de absorción a una temperatura de 302°C; a su vez, el chiller dispone de una válvula de tres vías que permite hacer Bypass de los gases de escape cuando la unidad no se encuentre en funcionamiento o los gases de escape que no necesite (en caso que opere en cargas parciales), lo cual se decide según las rutinas de operación de equipos que se realicen en

pro de la demanda de agua helada del Distrito Térmico.

1.1.3. CHILLER ELÉCTRICO

Enfriador eléctrico con compresor tipo tornillo, con capacidad de hasta 117.8 TR, que operará eficientemente en el punto de entrega de 80 TR. Refrigerante R-134, cada uno de un circuito y un compresor.

1.1.4. SISTEMA DE CONDENSACIÓN

Conformado por un circuito que va desde las unidades enfriadoras de agua hacia las torres de enfriamiento, por medio del cual se realiza la condensación de las enfriadoras de agua y se evacua el calor generado por los enfriadores de agua.



Figura 2: Configuración Distrito Térmico de Frío

1.1. GENERACIÓN DE FRÍO Y ELECTRICIDAD

Tanto el circuito de agua helada como el circuito de condensación y cogeneración serán operados con bombas de alta eficiencia en un régimen variable de acuerdo con las secuencias configuradas en el sistema de control. Este tendrá la capacidad de sensar todos los puntos y nodos críticos del Distrito Térmico garantizando la eficiencia de producción de energía de acuerdo con la demanda requerida por

los clientes intramurales y/o extramurales. Así mismo se administrará y controlará la operación de los chillers cuando el sistema esté en modo Carga del Tanque. Para lograr los altos niveles de eficiencia, el Distrito Térmico operará a un Delta de Temperatura de 11,1°C, esto es temperatura del lado frío del intercambiador a 1,11°C y 12,22 °C al lado caliente. Con esta configuración, se suministrará al Centro Empresarial y Negocios Potencia una temperatura de 6,66°C y retornará a 13,33°C, para lograr un Delta de T de 6,67°C.

En el punto de máxima operación del sistema, del lado de retorno, el fluido de trabajo se mantiene a 12,22 °C y se distribuye entre el tanque de almacenamiento térmico y el circuito de chillers. El tanque almacena agua a 1,11°C bajo la termoclina y mediante el intercambio de calor con el circuito de agua helada, se entregará a 2,22°C mezclándose con el agua helada proveniente del circuito de enfriamiento

El flujo de agua continúa por el circuito de enfriamiento entrando en una primera etapa a 12,22°C al Chiller de absorción. En esta fase el agua será pre enfriada a 5,55°F [-12,69°C] y posteriormente ingresará a una segunda etapa de enfriamiento con los Chillers eléctricos para alcanzar una temperatura de 0°C.

Luego del recorrido del circuito en el punto de mezcla con el agua proveniente del tanque de almacenamiento térmico, la temperatura alcanza la

temperatura de 1,11°C y es dirigida al intercambiador de calor para nuevamente iniciar el ciclo de refrigeración.

El Distrito Térmico iniciará operando con un Chiller eléctrico y el Chiller de absorción, manteniendo el segundo Chiller eléctrico de respaldo y con agua como fluido de trabajo. A medida que la ocupación del cliente ancla y conexión de potenciales extramurales aumenta, la capacidad del Distrito será gradualmente incrementada con la entrada del segundo Chiller eléctrico de forma paralela y cuarta torre de enfriamiento, así como el uso de agua + ethylene glycol 10%. Las temperaturas de operación de la fase inicial y final se muestran en la tabla 2 a continuación.

Así mismo, el Distrito Térmico tendrá capacidad de expansión en la cogeneración, sin embargo, hace parte de una etapa aún en estudio por lo que no se incluye en el artículo.

Tabla 2: Temperaturas de operación del circuito de refrigeración

Sección del ciclo	Etapa Inicial			Etapa Final		
	T in (°C)	T out (°C)	ΔT (°C)	T in (°C)	T out (°C)	ΔT (°C)
Intercambiador de calor lado Distrito Térmico	4,44	12,22	7,78	1,11	12,22	11,11
Intercambiador de calor lado cliente	13,33	6,66	6,67	13,33	6,67	6,66
Intercambiador TES Lado Distrito Térmico	12,22	5,55	6,67	12,22	2,22	10
Chiller Absorción	12,22	5,55	6,67	12,22	5,55	6,67
Mezcla Absorción - Agua Caliente	6			5,83		
Chiller Eléctrico	6	3,33	2,67	5,83	0	10,5
Mezcla circuito enfriamiento y TES	4,44			1,11		

Fuente Propia

El Distrito Térmico cuenta con su sistema de condensación operando con los chillers, para lo cual se instalan tres (3) torres de enfriamiento en una primera fase y la cuarta a la entrada en operación del segundo chiller eléctrico, las cuales garantizan la temperatura adecuada para la extracción de calor. Estos circuitos operarán con una temperatura de entrada de 35,5°C y al rechazo de calor se obtendrá una temperatura de 30°C. Durante todas las fases del proyecto el Delta de T se mantendrá en 5,55°C variando únicamente el caudal del agua de condensación.

Durante los periodos nocturnos, el Distrito Térmico entrará en modo carga de tanque en el cual el sistema de control invertirá el sentido de bombeo. El agua de mayor temperatura del tanque de almacenamiento circula por el intercambiador de calor con el circuito primario garantizando una temperatura de salida de 11,1°C y retorno 1,11°C. En el circuito de enfriamiento el chiller de absorción pre enfriará el agua de 10°C a 5,55°, mezclándose posteriormente con el agua del circuito a una temperatura de 7°C. Este flujo continúa a los chiller eléctricos donde finalmente se enfría el flujo a 0°C. El circuito finaliza con el intercambio de calor en el tanque de almacenamiento térmico.

1.2. ALMACENAMIENTO TÉRMICO.

El almacenamiento de energía térmica – TES- es una tecnología que acumula energía mediante el calentamiento o enfriamiento de un medio de almacenamiento, de modo que la energía de provisión puede utilizarse posteriormente para aplicaciones de calefacción, refrigeración o para la generación de potencia. Cuando se configuran distritos térmicos, el TES toma forma de almacenamiento de frío, empleando un tanque aislado de agua que se enfría o congela durante los períodos de menor demanda (baja demanda de refrigeración), generalmente durante las noches y/o los fines de semana, y posteriormente se alienta o derrite durante los períodos de mayor demanda (alta demanda de refrigeración), generalmente durante el día en los días entre semana.

El uso de TES en los distritos térmicos permite que funcionen un menor número de enfriadores o de menor capacidad durante los períodos pico, que los que serían necesarios para satisfacer las cargas de refrigeración máximas, descargando el TES para satisfacer parte o incluso toda la carga pico de refrigeración del distrito. La capacidad adicional de los enfriadores funciona durante los períodos de menor consumo para recargar el TES, mientras que cualquier carga de refrigeración en el distrito de menor consumo se satisface simultáneamente.

Las tecnologías TES para el almacenamiento en frío incluyen dos tipos distintos:

- Sistemas de almacenamiento de calor latente, como el TES de hielo en el que la energía térmica se almacena como un cambio de fase del medio de almacenamiento, generalmente entre los estados sólido y líquido.
- Sistemas de almacenamiento de calor sensible, como el agua helada y el fluido de baja temperatura (LTF), en el que la energía térmica se almacena como un cambio de temperatura en el medio de almacenamiento.

Beneficios de implementar TES en un distrito térmico:

1. Ahorros operacionales asociados al consumo de energía.
2. Reducción de la capacidad instalada necesaria de la planta de agua helada.
3. Balance entre los perfiles de carga térmica y eléctrica, para despliegue de sistemas de cogeneración.
4. Mejora de la eficiencia energética en el lugar.
5. Reducción del uso de combustible y de las emisiones en las centrales de generación.
6. Mayor flexibilidad para la operación y el mantenimiento.
7. Capacidad térmica de emergencia en espera.
8. Reserva de emergencia para el agua de reposición de condensación para enfriadores.
9. Almacenamiento de agua para protección contra incendios aplicable a los TES.
10. Localización remota satélite de TES para atención de potenciales clientes.
11. Temperatura de distribución baja, aumentando el ΔT – Delta de Temperatura.

Con base en el marco teórico presentado previamente, se decide implementar un sistema de almacenamiento de energía térmica con calor sensible a partir del agua helada producida por los enfriadores. A continuación la descripción del sistema:

Los sistemas de almacenamiento de agua helada utilizan el calor sensible del agua para almacenar energía en función de la temperatura del agua, (o agua + Ethylene glycol 10%). Esta es enfriada por el sistema de chillers y posteriormente es almacenada en el tanque, el cual se carga con temperaturas entre 1,11°C y 4,44°C. La cantidad de energía de almacenamiento depende del volumen de agua almacenada y de la diferencia de temperatura entre el agua helada almacenada en el tanque y el agua de retorno de carga (mayor temperatura).

Los tanques de almacenamiento de agua enfriada por estratificación utilizan las densidades del agua para realizar la separación entre el agua fría y el agua con mayor temperatura, formando una línea imaginaria llamada termoclina, la cual mantiene el agua helada en la parte inferior del tanque y el agua con mayor temperatura en la parte superior.

Durante el ciclo de carga, el agua helada ingresa al tanque a través de difusores en la parte inferior, y el agua con mayor temperatura sale a través del tanque por medio de difusores en la parte superior. A medida que aumenta el volumen de agua helada se va desplazando el agua con mayor temperatura y aumenta la termoclina. En la descarga el proceso es al contrario; el agua con mayor temperatura (de retorno) entra por la parte superior del tanque y el agua fría (almacenada) sale por el difusor ubicado en la parte inferior del tanque, disminuyendo así la termoclina. Una diferencia de temperatura entre el agua enfriada almacenada y el agua con mayor temperatura aumenta la diferencia de densidad, lo que facilita la estratificación. Este sistema puede entregar del 90% al 95% de la energía almacenada como enfriamiento útil.

El Distrito Térmico Potenza contempla un tanque cilíndrico de 392 m³, cuando el sistema se carga con agua helada a 4,44°C la capacidad de almacenamiento neta es 1.000 TR-h y a futuro se cargará a 1,11°C para una capacidad de almacenamiento neta de 1.500 TR-h.

El tanque dispone de un intercambiador de calor que separa la incidencia de la presión estática del edificio - cliente ancla -, y por tanto cada lado del intercambiador de calor vincula su propio sistema de bombeo configurado para operar en modo reversible, esto es, en modo descarga (entrega de capacidad del tanque) las bombas toman el agua fría del tanque (difusor inferior) a la condición de temperatura almacenada, y la entregan a la tubería principal del circuito primario. En el modo carga del tanque (almacenamiento de capacidad) las bombas toman el agua del retorno del tanque (difusor superior) y la entregan a la línea de retorno principal del circuito primario. La bomba del tanque está dimensionada para vencer la presión del sistema incluyendo circuitos de tubería, difusor del tanque y presión estática del tanque, para un caudal de carga o descarga de cada tanque de máximo 0,025

m³/s (con ΔT de 7,8°, almacenamiento a 4,44°C y retorno de 12,22°C), con cabeza de 269 kPa

En el modo carga del tanque, las válvulas automáticas que dan paso hacia el intercambiador de calor estarán cerradas, de tal forma que la energía entregada por los enfriadores / chillers es dirigida hacia el tanque para poder hacer almacenamiento de energía.

Los horarios de operación del sistema para modo carga y descarga de los tanques (secuencia y operación de las bombas), así como de temperaturas de almacenamiento serán controladas y monitoreadas por el sistema centralizado de control.

2. APROVECHAMIENTO DE CALOR RESIDUAL Y GEOTERMIA

Dentro de la operación del distrito térmico hay dos tipos de aprovechamiento energético: el primero se dará aprovechando el calor residual de los gases de la combustión y el segundo se hará con el aprovechamiento de las napas y su baja entalpía, por medio de un pozo profundo.

2.1. Calor Residual

El aprovechamiento de calor residual del distrito térmico se dará conduciendo los gases de escape con temperaturas de hasta 302°C, con caudal másico de 2,34kg/s; generados por dos microturbinas de 164 kW c/u alimentadas con gas natural. Los gases de combustión, de estos equipos alimentará a un chiller de absorción de 178 TR. Este equipo hará un aprovechamiento del calor residual reduciendo 182°C la temperatura de entrada; con el fin de generar parte del frío que el centro empresarial Potenza (CENP) demandará. Logrando así un aumento en la eficiencia del sistema de enfriamiento.

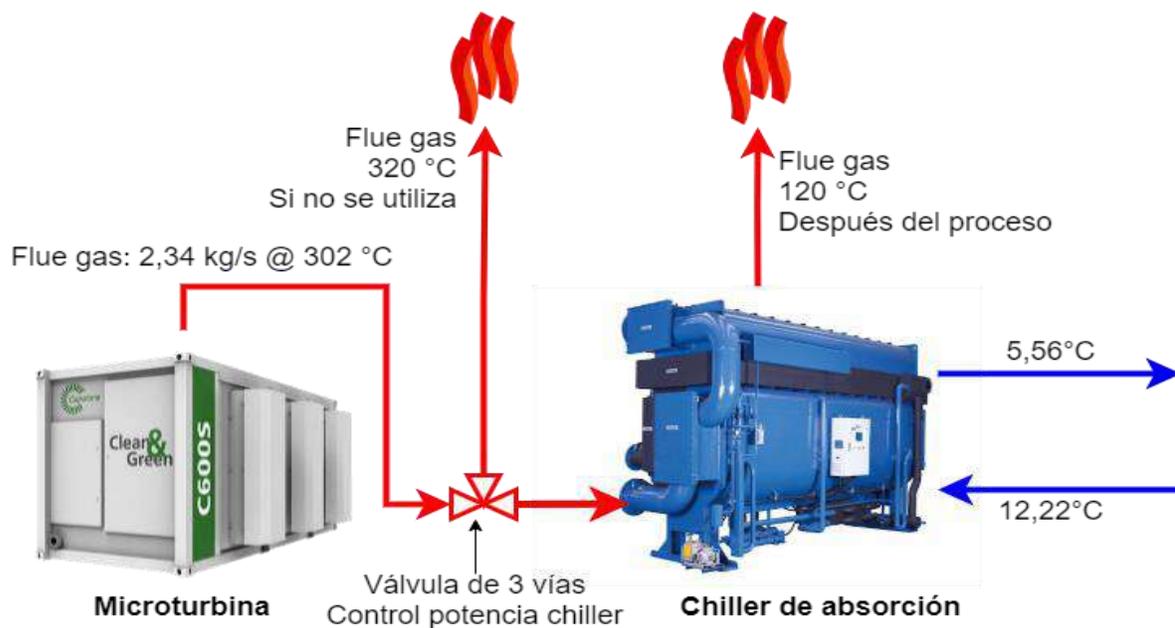


Figura 3: Aprovechamiento de calor Distrito Térmico

2.2. Geotermia

La geotermia en el distrito térmico Potenza, está dada por el aprovechamiento de las bajas temperaturas del agua subterránea que se extraen de un pozo profundo ubicado en el sótano 3 del edificio CENP. El pozo final, tiene un diámetro de 8" con una profundidad total de 81.2 metros, el sistema de bombeo está compuesto por una bomba sumergible de 4" con su respectivo motor de 5 HP, con un rango de operación 25 a 80 gpm. La bomba que lleva el agua de reposición desde el pozo hasta las torres de enfriamiento está ubicada a 60 metros dentro del pozo profundo. El

consumo de agua del sistema de condensación, causado por la evaporación, purga y arrastre, es de 3.82 m³/h pico o 55.62 m³/día, el cual es suministrado en su totalidad por el sistema de pozo profundo.

En cuanto al uso napas del pozo profundo y teniendo en cuenta que las temperaturas del fluido (26,6°C) están por debajo de la temperatura ambiente (en el día 30°C o más); los beneficios esperados van desde ahorros en consumos de energía eléctrica en las torres de enfriamiento y el

aumento de la confiabilidad en el suministro permanente del agua en el sistema de condensación de los chiller.

3. CAPACIDAD POTENCIAL

El proyecto Distrito Térmico del CEN Potenza a previsto un escenario de penetración al considerar en su implementación atender la torre 2 del Centro Empresarial con la posibilidad de extenderse estratégicamente dentro de su fase de operación a posibles edificaciones cercanas al sector del Barzal bajo (Villavicencio), donde está ubicado el Centro Empresarial y de Negocios Potenza. Este crecimiento proyectado a mediana escala diversifica la capacidad instalada del proyecto para caracterizar clientes potenciales interesados en climatización de espacios y oficinas ubicados entre los 200 metros a 650 metros de distancia. Seleccionado este polígono para desarrollar estudios de factibilidad se ha consolidado información relevante para posibles usuarios como edificaciones comerciales, consultorios médicos, clínicas y universidades. En adelante se trabaja en la evaluación de viabilidad como el cálculo de la demanda con precisión para dimensionar componentes y subsistemas de la planta central.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto Distrito Térmico Potenza en la ciudad de Villavicencio ha generado grandes retos, así como oportunidades para todos los actores involucrados. Desde los retos tarifarios, para lograr unos costos competitivos en el gas natural y el agua, el apoyo de entidades públicas locales y nacionales con el fin de lograr los permisos de obras para la ejecución del proyecto, así como políticas que regulen y viabilicen este tipo de iniciativas, hasta la diligencia de obtención de incentivos tributarios donde se busca obtener eficiencias en el Capex permitiendo mayor interés por parte de los inversionistas. Este tipo de proyectos permiten enfocar las políticas públicas a una visión sostenible para la planeación de ciudad y demuestran que el potencial de los Distritos Térmicos en Colombia es plasmable en iniciativas que se están ejecutando. Así mismo, el interés del sector privado será quien dé la oportunidad de entrar con nuevas tecnologías al mercado entendiendo los nuevos modelos de negocio que se inician a gestar con el Distrito Térmico y los contratos a largo plazo que se suscribirán para el suministro de energía térmica a los clientes.

En definitiva, con este proyecto buscamos innovar en la configuración de la planta de agua helada mediante la incursión de sistemas de almacenamiento térmico y aprovechamiento de los recursos naturales disponibles en la zona de operación como gas natural y recurso hídrico subterráneo, contribuyendo con el crecimiento sostenible de la ciudad.

NOMENCLATURA

SIGLAS

TES Almacenamiento Térmico de Energía, por su sigla en inglés, Thermal Energy Storage.

LTF Fluido de baja temperatura, por sus siglas en inglés, Low Temperature Fluid
CENP Centro Empresarial y de Negocios Potenza

SÍMBOLOS

ΔT Delta de Temperatura, es la diferencia de temperatura entre dos (2) puntos de medición, los cuales se diferencian por tiempo y/o posición.
gpm Galones por minuto
kWe Kilo Watios

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la junta directiva de Llanogás y a la gerencia por su visión y confianza, a Potenza que ha creído y apoyado en todo momento el distrito como su fuente de suministro energético principal, a la secretaría de ambiente, planeación y Cormacarena por su apoyo e interés en el proyecto para la obtención de permisos, al ministerio del medio ambiente y a UNIDO, por considerar y entender el gran potencial que posee Villavicencio como ciudad sostenible y por su apoyo constante para lograr desarrollar este proyecto, a toda la mesa técnica Grupo de Llano del proyecto distritos térmicos tanto misional como corporativa, por hacer que las cosas sucedan.

REFERENCIAS

- Building Technology Consultant SAS. (2021). Memoria Descriptiva del Proyecto. Consultoría Diseños de Ingeniería a nivel Conceptual y Básico Distrito Energético Potenza.
- AQUALOGS & Gases del Llano. (2021). Reporte N°1. Consultoría Estudio de Caracterización Hidrogeológica del Recurso Hídrico en Proyecto Potenza.
- AQUALOGS. (2021). Reporte N°2. Consultoría Estudio de Caracterización Hidrogeológica del Recurso Hídrico en Proyecto Potenza

Análisis Transitorio de un Distrito Térmico, Caso de Estudio La Babilla del Malecón

G. Daniela López^{1*}; Lisseth M. Cruz²; Camilo A Arias³

¹gdlopezp@correo.udistrital.edu.co; ²lmcruzr@correo.udistrital.edu.co ; ³carias@udistrital.edu.co

RESUMEN

En el marco del primer concurso universitario de Distritos Térmicos liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la UTO, la SECO, EPM, y la APC, que buscaba la intervención de universidades nacionales en la conceptualización de un proyecto con alto valor para la sostenibilidad urbana, enfocado en la búsqueda de una solución conceptual de climatización mediante un distrito térmico para el proyecto El Gran Malecón - La Loma - Barranquilla, el grupo de investigación GIEAUD conceptualizó una solución técnica de refrigeración centralizada llamada: "El Distrito Térmico la Babilla del Malecón".

En el presente documento se presenta el proceso de dimensionamiento de un sistema de generación de frío por medio de un ciclo de trigeneración con aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, también se ahonda en el cálculo del sistema de distribución energética y finalmente se realiza la selección de las unidades terminales de tratamiento de aire. Asimismo, se desarrolla la simulación del distrito mediante la herramienta computacional TRNSYS V.17, obteniendo variables que permiten estudiar el sistema, mediante la eficiencia y el comportamiento de algunos de los equipos con el objetivo de validar la viabilidad del proyecto desde varios enfoques.

Debido a los resultados encontrados, la discusión posterior se centra en el potencial que tienen los distritos térmicos en Colombia, proyectando su expansión en el país con miras a implementación de estrategias para generar reposición de los convencionales sistemas de acondicionamiento de aire por los distritos térmicos, resaltando las ventajas que representa este cambio desde diferentes sectores

ABSTRACT

In the context of the first university competition for Thermal Districts led by the Ministry of Environment and Sustainable Development, through the UTO, SECO, EPM, and the APC, which sought the intervention of national universities in the conceptualization of a project with high value for urban sustainability, focused on the search for a conceptual solution for air conditioning through a thermal district for the project El Gran Malecón - La Loma - Barranquilla, the GIEAUD research group conceptualized a technical solution for

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Ingeniera Mecánica; Bogotá; Colombia; 315582117
gdlopezp@correo.udistrital.edu.co

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Tecnóloga Mecánica; Bogotá, Colombia; 3194917174,
lmcruzr@correo.udistrital.edu.co

³ Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Docente PhD Ingeniería Energética; Bogotá, Colombia; 3208364303,
carias@udistrital.edu.co

centralized refrigeration called: "The Thermal District the Babilla del Malecón".

This document presents the sizing process of a cold generation system by means of a trigeneration cycle with use of solid urban waste, it also delves into the calculation of the energy distribution system and finally the selection of the terminal air handling units. Likewise, the district simulation is developed using the TRNSYS V.17 computational tool, obtaining variables that allow the system to be studied, through the efficiency and behavior of some of the teams in order to validate the viability of the project from various approaches. With the results found, the subsequent discussion focuses on the potential that thermal districts have in Colombia, projecting their expansion in the country with a view to implementing strategies to generate replacement of conventional air conditioning systems by thermal districts. Highlighting the advantages that this change represents from different sectors

Palabras Clave

Energías, Malecón, Distrito Térmico, Simulación.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en la región de América Latina y el Caribe se producen tan solo el 5% de las emisiones de gases de efecto invernadero del mundo. En Colombia anualmente se emiten 84.092 kilotonnes de CO₂. (World bank group, 2017) En los últimos años el país ha enfocado sus objetivos en materia energética con los compromisos internacionales desarrollados como respuesta ante la actual preocupación mundial por reaccionar a la amenaza que representa el cambio climático; surgen responsabilidades como los acuerdos firmados en la Conferencia de las Partes COP 21 (2015), COP 25 (2019) y ODS en los cuales existe participación nacional al integrar el grupo de países adscritos a Naciones Unidas. Según las estadísticas del Banco Mundial para el año 2016 en Colombia se generaron 97813.56 Kt CO₂ (Kilotoneladas de dióxido de Carbono), el sector de la generación de electricidad abarcó alrededor del 10,4% con un total de 10.223.458,75 de emisiones de GEI al 2016. (XM,2017) Algunas de las metas propuestas en el territorio nacional son disminuir un 20% las misiones de GEI para el año 2020 y cumplir con una reducción del indicador de intensidad energética en un factor de (0,79%) e intensidad de emisiones (0,29), según informe de la UPME. (INCOMBUSTIÓN,2014)

De acuerdo con el compromiso de la ODS, en el país se han propuesto estrategias orientadas a la incursión de tecnologías de mitigación, adaptación

e implementación de sistemas en materia energética, en este contexto surge el proyecto "Distritos Térmicos en Colombia", que busca mejorar la eficiencia energética de los edificios y sustituir las sustancias agotadoras de Ozono (SAO) y Gases de Efecto Invernadero (GEI)(ACAIRE,2016), esta iniciativa se desarrolla en primera instancia con la implementación de un plan piloto de Distrito Térmico y en segunda instancia promueve la ejecución de distritos térmicos en diferentes regiones del país. En línea con lo anterior en 2019 surge la primera convocatoria formal de Concurso de Distritos Térmicos en Colombia, en la cual universidades a nivel nacional presentan una alternativa frente a la problemática de acondicionamiento planteada para la zona El Gran Malecón - La Loma - Barranquilla, en pro de esta iniciativa participa la Universidad Distrital Francisco José de Caldas con el grupo de investigación de energías GIEAUD, implementando la propuesta: "La Babilla del Malecón".

El Distrito Térmico la Babilla del Malecón es el nombre que recibe la solución energética propuesta por parte de la Universidad Distrital; es una productora de agua helada con una red de distribución energética para el área del "Gran Malecón del Río" elegida por ser una de las zonas con mayor potencial para desarrollar un distrito térmico en Colombia luego de evaluar factores como la demanda de refrigeración y la geografía apropiada para crear amplias posibilidades; adicional del reciente impulso urbano y la

renovación que ha tenido la ciudad, en especial el Malecón que tiene una de las proyecciones más importantes de la región. El distrito se plantea para atender una demanda 87.000 TR (toneladas de refrigeración), la carga distribuida de la siguiente manera: 67.693 TR destinadas para el sector residencial, el restante se divide en 10.224 TR para hoteles, cuatro manzanas para uso mixto 8.348 TR y la alcaldía de la zona que alcanza de 92,9 TR del total del proyecto. Está planteado para construirse en la vía central de la isla, en el corazón del desarrollo urbanístico, en un edificio de 6 metros de alto con fachada ecológica y un parque en la cubierta de todas las construcciones, arquitectónicamente el proyecto está dividido en 26 manzanas, las cuales se distribuyen de acuerdo al tipo de locación, así : en su mayoría 79,9 %, construcción se destina al uso residencial, el porcentaje restante se divide en 11,7 % para hoteles, cuatro manzanas para uso mixto 9,5 % y la alcaldía de la zona que alcanza de 0,1 % del total del proyecto.

A continuación, se explica el desarrollo conceptual y técnico realizado para llegar a la propuesta de Distrito Térmico La Babilla del Malecón, describiendo cada una de las consideraciones tomadas para la selección, integración y simulación de los equipos que componen el sistema termoenergético. Se analiza la viabilidad del proyecto de acuerdo a su construcción, comportamiento, eficiencia e interacción con el medio. Este documento se relaciona con el entorno de la promoción de distritos térmicos en el país, en la segunda fase del concurso de Distritos Térmicos se integran la UPME y ACAIRE, instituciones que apuntan a garantizar la sostenibilidad del conocimiento, por eso se implementa un eje de investigación exclusivo para distritos térmicos a cargo de ACAIRE y CIDARE. Se resalta como fundamental la promoción del papel de la academia en la investigación y la búsqueda de soluciones innovadoras para el sector.(ACAIRE,2019) El trabajo presentado realiza aportes principalmente en el sector de desarrollo tecnológico, enlazado con los objetivos expuestos por las entidades nacionales anteriormente.

1. OBJETIVOS

Diseñar una propuesta conceptual aterrizada de distrito térmico para la problemática de acondicionamiento de aire de la zona del Gran Malecón.

Analizar la operación del distrito térmico “La Babilla del Malecón” y la interacción de cada uno de los subsistemas y elementos independientes que lo componen, evaluando el conjunto termodinámico mediante un primer proceso de simulación en estado transitorio.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En la descripción del sistema se realiza un breve acercamiento al concepto desarrollado en la propuesta técnica generada con base en la demanda y distribución arquitectónica que maneja el proyecto, posterior, se detalla la forma de operación del distrito y la interacción de cada uno de los subsistemas y elementos independientes que lo componen, también se hace mención del alcance y proceso llevado a cabo para evaluar el conjunto termodinámico mediante un primer proceso de simulación en estado transitorio.

En términos energéticos, La Babilla del Malecón es una productora de frío, que definida la alta demanda por atender se diseña dividida en ocho grupos de fábricas independientes que pueden ligarse a un mismo sistema de distribución, la carga que suple cada una fue fraccionada de manera equitativa para cubrir las 87.000 TR. Cada una de las fábricas cuenta con un sistema termodinámico que se compone principalmente de tres subsistemas, el primero la fuente energética, el segundo la producción de frío y tercero la distribución de la energía generada; este proyecto se ocupa fundamentalmente del diseño y la simulación de los dos primeros subsistemas, por su robustez e impacto en el comportamiento general del sistema.

Tabla 1. Demandas por fábrica instalada.

Fábrica	Demanda [TR]	Absorción	Capacidad [TR]	Centrifugos	Capacidad # 1 [TR]	Capacidad # 2 [TR]
1	11.141	1	2.000	1+1	3.500	7.200
2	11.688	1	2.000	1+1	3.500	7.200
3	10.980	1	2.000	1+1	3.500	7.200
4	10.877	1	2.000	1+1	3.500	7.200
5	11.351	1	2.000	1+1	3.500	7.200
6	11.425	1	2.000	1+1	3.500	7.200
7	12.603	1	2.000	1+1	3.500	7.200
8	7.293	1	2.000	1+0	7.200	0

Fuente: grupo GIEAUD.

2.1. Diseño conceptual

2.1.1. Fuentes energéticas

Las fuentes energéticas de la Babilla del Malecón se ubican en tres grupos principalmente, el primero es la energía solar como fuente de energía renovable, se compone por un arreglo de paneles solares térmicos que alimenta mediante agua caliente al generador del chiller de absorción, se ubican en el corredor central del área de la vía principal, generando sombra y mejorando la sensación térmica y por ende el confort, condiciones aptas para promover el desarrollo comercial al aire libre. Mediante un circuito de bombeo recircula el agua hasta un tanque que recibe los caudales de agua caliente, este dispositivo de almacenamiento energético tiene un volumen de 216 m³ para alcanzar una autonomía de 14 minutos realizando un intercambio con las principales fuentes generadoras y receptoras. Para cubrir la demanda térmica del 20% se requerían cerca de 4.300 colectores solares térmicos de 2.4 m², es decir que para las 8 fábricas correspondería un arreglo de 34.400 paneles térmicos con un área total de 82.560 m², sin embargo, el área disponible para la ubicación de los mismos es de 68.000 m², por lo que se disminuye la cantidad de paneles a un 70% ocupando un área de 47.600 m², 5.950 m² por cada enfriador correspondiente a 2480 paneles solares térmicos en cada una de las fábricas, el calor adicional debe aportarse con mediante un generador de agua caliente que opera con los gases residuales de la turbina de gas o calentadoras auxiliares.

El segundo grupo de alimentación energética es el gas natural de línea, el cual es utilizado en un

sistema de cogeneración compuesto por una turbina de gas de 3,08 MW, cuyos gases residuales con temperatura aproximada de 250°C y flujo masico de 10.4 Kg/s alimentan un recuperador de calor en el que fluye el agua caliente generada por los paneles solares, otorgando aproximadamente 1522 kW en forma de calor que son entregados directamente hasta el enfriador de absorción, la energía eléctrica producida por la turbina es utilizada para alimentar eléctricamente todo el sistema, generar funcionamiento mecánico de los dos chiller de compresión de vapor y los ventiladores de las torres de enfriamiento utilizadas para la condensación en el proceso, el diseño original contempla un ciclo de trigeneración, utilizando una turbina de vapor, sin embargo, en la para el primer análisis de comportamiento al ser un elemento de generación complementario no se tendrá en cuenta.

El último grupo de suministro energético opera mediante biodigestores que se alimentan con los residuos orgánicos de la zona, realizan un proceso energético para soportar el funcionamiento del ciclo combinado (gas-vapor). Se determina que de cada 100 kg de RSG (residuos sólidos generados) 55,15 kg corresponden a MORB (materia orgánica rápidamente biodegradable), y de ellos se generan 0,93 Nm³ de biogás Normal/kg MORB, por lo tanto, la cantidad total de biogás normal generado cada día en el Distrito Térmico es: 46.056 Nm³/d con 52,8% de metano, que corresponde a un contenido energético aproximado de 1793 kJ/día - 0.498 kW. Este grupo no se contempla dentro del alcance de la simulación, por ser un soporte adicional al gas de línea que alimenta la turbina principal, pues su configuración en el software es compleja, no está completamente definida y la intención inicial del trabajo es validar la viabilidad del distrito, que en caso de ser positivo, el biogás actuaría como un elemento que aumentaría la el aprovechamiento energético disponible en las condiciones ambientales, mejoraría el impacto ambiental y económico del proyecto.

2.1.2. Generadores de frío

La generación del producto (agua helada), se realiza mediante un arreglo de enfriadores en serie, uno de

absorción y dos de compresión de vapor, esta configuración simplifica el sistema de control de encendido de los enfriadores, así el control opera mediante la temperatura del agua de retorno proveniente de la carga térmica. El chiller de absorción seleccionado es un enfriador de bromuro-Litio y agua de la marca York, YHAU-CL-2000-EXW4S-T-LL, este equipo es el encargado de cubrir el 20 % de la demanda total, correspondiente a 1940 TR, está ubicado en la primera estación donde ingresa el agua de retorno, proveniente de la carga térmica, con esto se asegura que el trabajo producido por la turbina sea utilizado en primera instancia en el ciclo de refrigeración y el restante pueda dirigirse a una red eléctrica para su uso posterior, también permite que se dé un aprovechamiento al sistema de alimentación de energía solar térmica como fuente renovable; para disipación de calor se configura una torre de enfriamiento individual con una capacidad de enfriamiento de hasta 1446 TR, es una condensadora de marca BAC series 3000 usada para las condiciones de diseño y ambiente planteadas.

El segundo grupo encargado de la producción de frío está conformado por los enfriadores de compresión de vapor encargados de generar 80 % de la energía, correspondiente a las 7200 TR restantes, estos equipos también de marca York, de la serie

YKEP, se ubican en serie de los primeros, es decir, el agua de entrada de los equipos de compresión de vapor es el agua de salida proveniente de los enfriadores de absorción, alimentados también por la turbina de gas. En las primeras siete fábricas se utiliza un arreglo de dos enfriadores, uno de 3500 TR y el otro de 7200 TR, para la octava sección (que fue la simulada en este proyecto) se utiliza únicamente un equipo de 7200 TR, en este caso para la disipación de calor es mediante un equipo igual que en el caso anterior.

Finalizando la descripción del primer subsistema se encuentra el almacenador de fluido energético negativo, para este propósito se emplea un tanque aislado de agua que se enfría durante los períodos de menor actividad (es decir, baja demanda de enfriamiento), y luego gana energía en forma de calor, produciendo calentamiento de los sectores en los que se acumula la menor temperatura del TES (almacenamiento de energía térmica por sus siglas en inglés), esto ocurre en los picos de demanda energética, inicialmente se selecciona un almacenador con volumen de 216 m³, suficientes para servir como amortiguador de los flujos de demanda que están entre 0.27 a 1.9 m³/s., ofreciendo 30 entre 2 y 13 minutos de tiempo para adecuar el fluido de impulsión el cual retorna a entre los 12 y 15 °C.

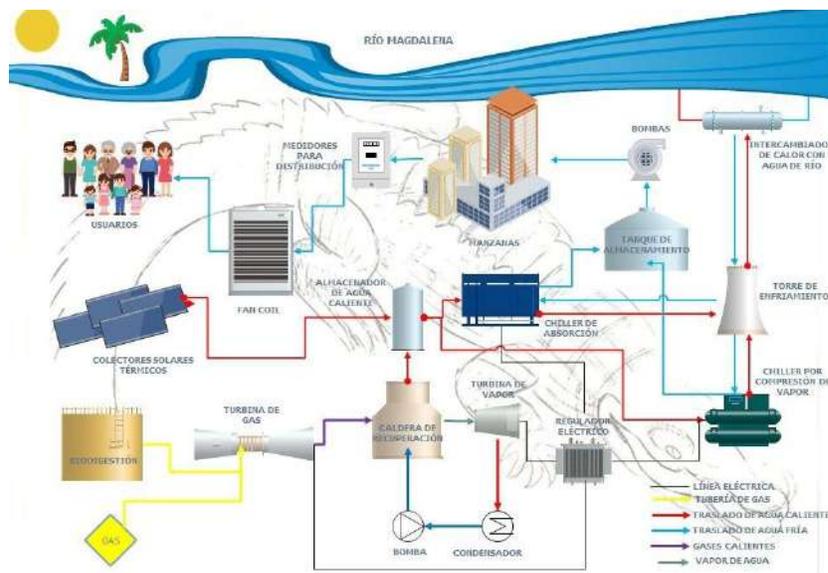


Figura 1. Esquema P&D de la propuesta La Babilla del Malecón

Fuente: los autores

2.1.3. Sistema de distribución

El sistema de bombeo y distribución, diseñado para cada una de las fábricas de frío con un caudal promedio de 2 m³/s se diseña con el propósito de mantener estable la temperatura del agua; durante su transporte se establece el uso de tubería pre aislada. Se considera la regulación europea aplicable a la definición de tuberías aisladas para distritos térmicos, la EN 253 (district heating pipes), se especifican los tipos de tuberías de acuerdo a los diámetros.

De acuerdo con lo anterior, se propone el uso de tuberías pre-aisladas Odelya, que cuentan con tuberías de transporte (interna) en acero A35, material apropiado para manejo de bajas temperaturas; es recubierto por una capa de material aislante: espuma de poliuretano de 80 mm de espesor aprox., con una densidad mayor a los 60 kg/m³ para ser usada como aislamiento dentro de rangos de temperatura normales (NT -60 °C - +140 °C); por último, la cubierta de la tubería es en polietileno de alta densidad (HDPE) con una

densidad mayor a los 940 kg/m³, el cual tiene una alta resistencia al impacto, a la humedad, salinidad y a los ataques químicos. Para la selección de los diámetros de las tuberías de distribución se tendrá en cuenta lo estipulado en el District Cooling Guide de la ASHRAE (ASHRAE,2013), donde se recomienda que el valor de la velocidad del agua por las tuberías de distribución oscile entre 1.8 - 2.2 m/s. La red de tuberías de diámetro variable, con un diámetro máximo en la salida del tanque.

Cada sistema de bombeo consta de dos bombas trabajando en paralelo, lo cual permite atender la demanda máxima pero también responder de manera efectiva a la disminución de ésta, trabajando en ese caso con una sola bomba y manteniendo un respaldo en caso de emergencia. Se seleccionan bombas de alta capacidad, baja cabeza y alta eficiencia para optimizar el consumo de potencia, Goulds modelo 3498 tamaño 20x24-20L a 1190 rpm, que para un punto de operación de 1 m³/s y 32 mca opera con eficiencia de 90% y una potencia de 350 kW.

Tabla 2. Parámetros generales de las líneas de distribución F.8

Tanque #	Manzanas asociadas	Caudal por manzana	Diámetro de tubería conexión a manzana	Caudal total por tanque	Diámetro de tubería para conexión a tanque	Longitud preliminar de suministro y retorno
		[m ³ /s]	[m]	[m ³ /s]	[pulgadas]	[m]
T8	4	0.12	8	1.39	36	740
	11	0.06	8			
	12	0.21	10			
	19	0.06	14			
	3B	0.94	32			

2.2. Simulación

La simulación del sistema está fundamentada en el diseño inicial planteado para el distrito térmico en estudio “La Babilla del Malecón”, sin embargo, algunas modificaciones fueron implementadas durante este proceso, a continuación, la descripción de la interconexión utilizada en la plataforma TRNSyS V.17 de los subsistemas involucrados y las consideraciones más relevantes para efectuar la simulación del sistema. La sección dispuesta para estudiar el comportamiento es la octava fábrica generadora de frío que consta de los elementos ya explicados en la sección de descripción de proyecto, sistema termodinámico. Es importante resaltar que la interconexión de las variables entre todos los

componentes de la simulación se realiza con rigurosa selección para dar una cohesión térmica y operativa al sistema.

Para efectuar la simulación termodinámica en estado transitorio, lo principal es contar con los datos psicrométricos del lugar estudiado, para esto se utiliza el type 15-2, que suministra los valores meteorológicos registrados mediante un instrumento de medición ubicado en una estación determinada, sin embargo, para obtener una destacada precisión de valores climáticos en la ubicación exacta del Malecón y teniendo en cuenta que la cercanía al río, genera una influencia importante en las propiedades psicrométricas, se

realiza una simulación adicional con la plataforma *Meteonorm* en la ubicación puntual del proyecto, el nuevo archivo .tm2 es guardado con la misma extensión desde el ordenador e incorporado mediante el link de ingreso de archivos exteriores que tiene el type dentro de su interfaz propia para configuración de parámetros. El segundo fundamental es el type 625, funciona mediante la importación de un archivo exterior que contiene los datos de comportamiento de una turbina de gas que opera sin inyección de agua, en este caso fue seleccionada una turbina Kawasaki de la línea Green, M1A series, es la turbina M1T-13D GPB30 de 3,08 MW de potencia, teniendo en cuenta que la operación de las 8 fábricas se daba mediante una turbina de gas que alcanzaba los 24.777 kW, por lo que al dividir esta capacidad en la cantidad de fábricas, se obtiene la potencia de la turbina seleccionada. Luego de modificar del archivo .dat necesario para la operación del equipo con los datos de la turbina original, se realizan las conexiones secuenciales. Para operar, los datos psicrométricos son incluidos mediante la conexión de con el type 15.2, la carga suministrada a la turbina es proveniente de los ventiladores de torres de enfriamiento (type 510) y de los dos enfriadores el de compresión de vapor (type 666) y de absorción (type 677), finalmente, los gases de salida de la turbina son directamente dirigidos hasta el dispositivo generador de agua caliente, que se utiliza como recuperador de fluido energético, con el fin de optimizar la eficiencia del distrito. El recuperador de calor para generación de agua caliente no funciona mediante la implementación de un archivo externo de tipo Tess catálogo para establecer su comportamiento, así, el único requisito para su operación es establecer el flujo másico de fluido 10,4 kg/s y establecer las propiedades termodinámicas de los fluidos que intervienen, la fuente encargada de suministrar la energía en forma de calor (gases de escape de la turbina), y la carga (agua) que aumentará su temperatura para luego ser impulsada hasta el tanque de almacenamiento de energía caliente desde donde se impulsa hasta el generador del chiller de absorción, el fluido que actúa como la carga, vuelve a ser suministrado desde la sección con menos temperatura del tanque

de almacenamiento positivo, agua resultante del proceso dentro del chiller de absorción, así se mantiene la inercia de los fluidos dentro del almacenador y recuperador de calor.

El chiller de absorción funciona con un archivo de comportamiento externo de tipo Tess catálogo, el cual otorga la posibilidad de analizar cualquier enfriador del mercado dentro de la interfaz del software por medio de un archivo de normalización de datos de comportamiento construido y configurado por el diseñador, en este caso para el chiller marca York, YHAU-CL-2000-EXW4S-T-LL, dentro de la configuración se incluyen valores de tablas de datos construidas mediante interpolación gráficas y tablas propias del equipo, dicha información es obtenida mediante las pruebas ejercidas por el fabricante. La salida del equipo de absorción, fluye a través del chiller de compresión generando un control automático, es decir si la carga es suficiente para ser cubierta por la máquina de absorción, fluirá a través del circuito de agua del segundo equipo centrífugo, sin embargo, si esta carga es mayor a las 2000 TR que tiene como capacidad de enfriamiento el primer chiller, la propia configuración de sensores de controlará el encendido del segundo equipo, una vez el fluido evacua el sistema compuesto por las maquinas generadoras de agua helada, se dirige hasta el tanque que guarda energía con sentido negativo, acumulando fluido con temperaturas por debajo del cero absoluto. Para ambos enfriadores la condensación funciona mediante un circuito cerrado de torre de enfriamiento (type 510), opera sin la necesidad de implementar un archivo externo, lo que significa que para realizar correctamente su ciclo de operación basta con establecer correctamente la configuración de parámetros, entradas y salidas dentro de la interfaz del programador, para la simulación realizada fue muy importante hacer la referencia e interconexión completa de todos los datos psicrométricos del lugar de instalación del circuito de torre, pues la operación de este equipo depende directamente del intercambio realizado con el ambiente.

La carga térmica se simula mediante un calentador auxiliar, el agua fría entra al dispositivo representado por el (type 6) aproximadamente entre 6° y 7°, en la configuración se establece la potencia y "set point" aumenta la temperatura del agua, este montaje se realiza con el fin de simular el calor que aportado al fluido naturalmente por la carga térmica real proveniente de las locaciones, como complemento se añade un perfil de carga construido con base en la simulación de una locación integrando las condiciones térmicas de la ciudad de Barranquilla, para este fin se utiliza el software térmico *Cype* que cuenta con los datos climatológicos publicados por ASHRAE, en el ejercicio se representa una edificación residencial convencional contemplada con materiales y con una ocupación promedio basada en la experiencia en diseños de sistemas HVAC, datos de radiación y psicrometría propios de la aplicación. El resultado obtenido es una curva de perfil de carga que estabiliza en su mínimo rango energético entre las 2:00 a.m. y las 6:00 a.m., a partir de esta hora comienza a presentar un incremento consecuente con los factores de inicio de la actividad humana, a partir de esta hora, el aumento es lineal constante, conforme van avanzando las horas hasta las 05:00

p.m., después de esta hora la carga comienza a presentar una disminución significativa.

2.2.1. Desarrollo de los archivos [Tess catálogo]

Con el fin de adoptar el comportamiento más aproximado de las principales máquinas dispuestas dentro del montaje de simulación, se opta por utilizar Types catálogo, que utilizan archivos externos .dat configurados para establecer la eficiencia del equipo en diferentes escenarios, esto mediante datos extraídos de las curvas de comportamiento reales de los equipos, suministradas por los fabricantes. Debido a que los archivos de datos están normalizados, es posible modelar enfriadores de cualquier tamaño utilizando el conjunto determinado de archivos de datos creados por los autores. Los Types utilizados con catálogo se desarrollaron para el chiller de absorción Type, representación del chiller YHAU-CL-2000-EXW4S-T-LL, mediante 7 gráficas se desarrollan los archivos Tess Catalogue S1, S2 y S3, la turbina de gas GPB30 a cargas parciales, Kawasaki compuesta por el archivo Tess Catalogue nowinj, y el chiller de compresión de vapor YKEP compuesto por los archivos Tess Catalogue C. Dat y PLR.Dat.

2.3. Producto simulación TRNSys V.17

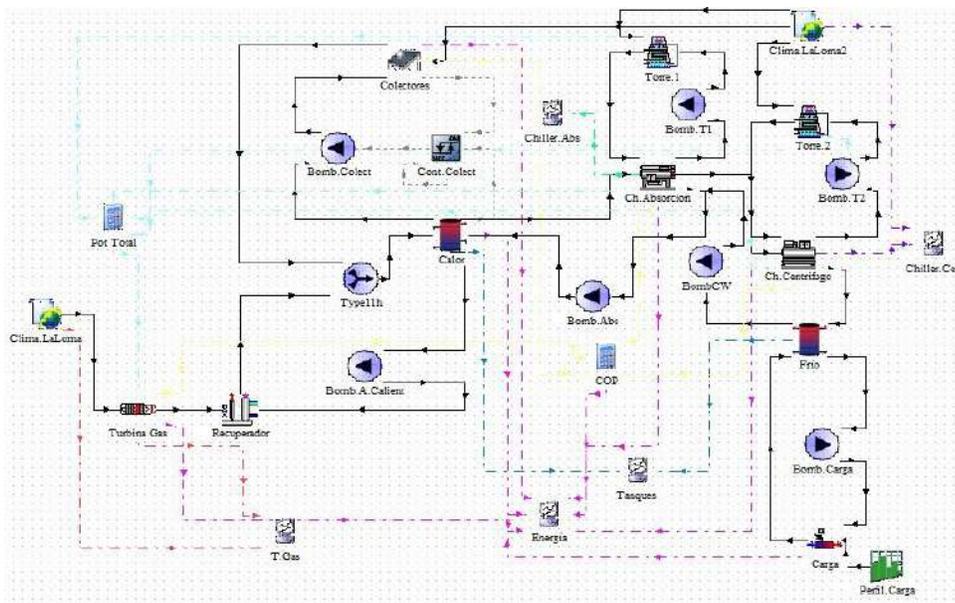


Figura 2. Interfaz simulación completa, Distrito Térmico La Babilla del Malecón

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Suministro energético (etapa 1)

Las fuentes energéticas, la turbina y los paneles solares, presentan un patrón de comportamiento guiado por los picos de demanda representados en la carga térmica, indicando los más altos niveles de

funcionamiento cuando se requiere la mayor demanda de frío en las edificaciones.(Figura 3.) La potencia suministrada al chiller de compresión está soportada principalmente por la turbina de gas, dentro de la gráfica de operación se observa que esta incrementa la producción energética en el momento de operación del enfriador.

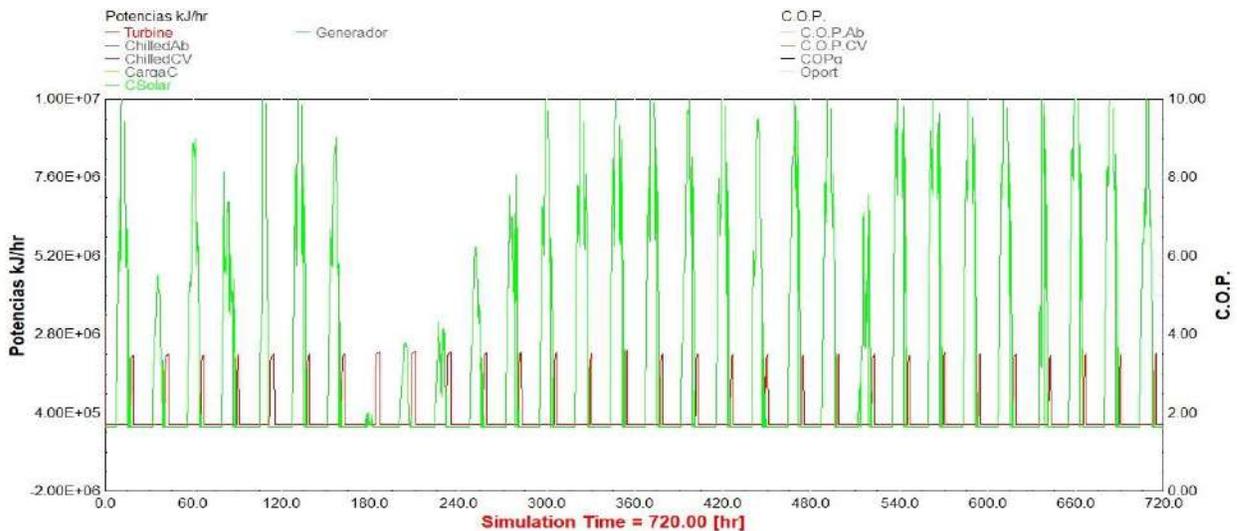


Figura 3. Fuentes de suministro energético del distrito térmico.
Fuente: elaboración autores mediante Trnsys.

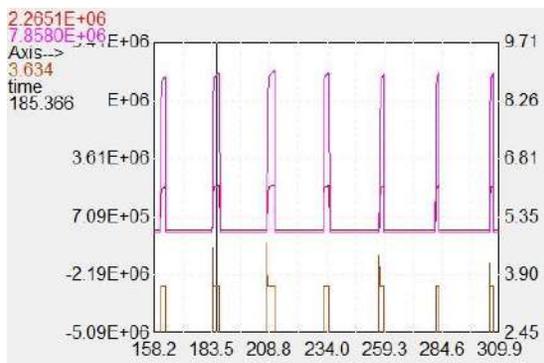


Figura 4. Comportamiento enfriador de compresión y fuente de energía
Fuente: elaboración autores mediante Trnsys.

La cantidad de potencia suministrada por la turbina es de 627,78 kW en el punto de máxima demanda entre la 1:00 p.m. y las 4:00 p.m., esto correspondiente a un C.O.P de 3.613 en el subsistema de compresión de vapor, sin embargo, para calcular la eficiencia del sistema del sistema, solo debe evaluarse el porcentaje suministrado al chiller de compresión de vapor.

$$COP = \frac{2182,77 \text{ kW}}{604,020 \text{ kW}} = 3,613 \quad [1]$$

El coeficiente de desempeño evidenciado en la Figura 4 es de 3,634 (color café), por su parte lo calculado mediante la ecuación termodinámica es igual a 3,613. Aunque la energía generada por la turbina para este punto es de 629,19 kW, aproximadamente un 4% de esta energía es destinada para el funcionamiento de las torres de enfriamiento. En la Figura 4 se evidencia claramente la carga suministrada por el enfriador de compresión de vapor (rosado) y la potencia suministrada por la turbina (rojo). Para equipo de absorción, la fuente energética está constituida principalmente por el arreglo de paneles solares y calor emitido por los gases de escape de la turbina de gas, que son recuperados por un generador de energía.

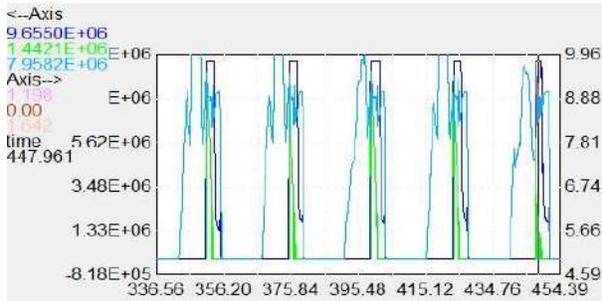


Figura 5. Comportamiento enfriador absorción y fuente de energía.

Fuente: elaboración autores mediante Trnsys.

La energía que suministran los paneles, está ligada con los cambios ambientales, aun cuando la simulación que se está realizando funciona durante un mes, se evidencia que en algunas fechas hay más producción energética. Durante el arranque del pico se evidencia que el chiller de absorción es alimentado por la energía almacenada en el tanque (azul claro). La potencia está siendo producida previa a la operación completa del equipo, teniendo en cuenta la estabilidad que hay que suministrar en el tanque de agua a alta temperatura. La energía solar funciona mediante un control On-Off, permitiendo el suministro de energía cuando se descompensa el tanque. Gráficamente se obtiene un desempeño muy similar de 1.198. En el punto más álgido de operación de 4 horas aproximadamente, entre 1:00 p.m. y 4:00 p.m. Al evaluar teóricamente el coeficiente de desempeño en este punto se obtiene el siguiente resultado con la ecuación de energías destinada para este fin, a continuación:

$$COP = \frac{504,94 \text{ kW}}{416,33 \text{ kW}} = 1,2132 \quad [2]$$

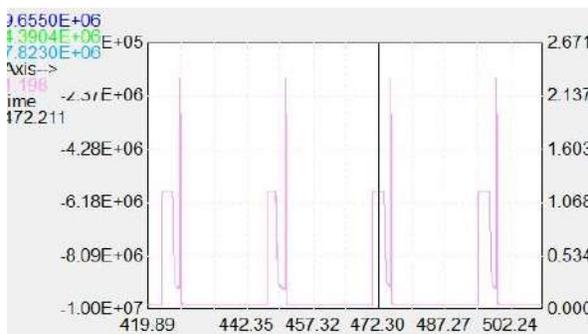


Figura 6. C.O.P. Chiller de absorción.

Fuente: elaboración autores mediante Trnsys

Es preciso mencionar que la demanda de refrigeración entregada por el diseñador, además de ser tan elevada fue analizada en un capítulo anterior, se evidencia bastante conservadora con respecto a la cantidad de frío necesaria por m² establecida la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), lo anterior se menciona, pues pueden presentarse comportamientos inesperados en la simulación al intentar consolidar tanta energía dentro de un dispositivo como un calentador auxiliar (*type 6*); es decir aunque los equipos tienen la capacidad, valores y curvas de eficiencia reales, se han guardado las proporciones de capacidad para efectos prácticos dentro del proceso de simulación, pues indiferente a la carga del sistema, al tener relacionada la información real de los equipos y su integración en el distrito térmico, la eficiencia es correspondiente.

La carga máxima soportada por el dispositivo auxiliar es de 750 TR, en el lapso que ambos enfriadores están en operación, el chiller de absorción suministra promedio 1.898.300 KJ/h que son 149,94 TR, mientras que el chiller de compresión tiene cubrimiento de 7.696.300 KJ/h de potencia equivalente a 607,89 TR, manteniendo una relación exacta de 24,66% por 75,34%, que se encuentra precisamente dentro del rango establecido para la fábrica simulada que tiene 9.200 TR de carga, y un enfriador cubre 7200 TR, mientras el otro alcanza las 2000 TR. En la relación propuesta, el chiller de absorción tiene un poco más de alcance, un 27%, sin embargo, en la realidad se evidencia que, aunque se mantiene dentro del rango, el valor de participación en la producción disminuye con respecto a lo diseñado y propuesto.

3.2. Generación de frío (etapa 2)

Las gráficas de comportamiento correspondientes a los chillers permiten analizar las potencias de frío generadas para el cubrimiento de la demanda de climatización. En la simulación realizada por un periodo de 720 horas (1 mes), se observa que el primer equipo que entra en operación es el enfriador de absorción, cumpliendo con lo diseñado, el

ejercicio comienza a funcionar en los picos de la demanda térmica, una vez alcanza cierto tiempo de operación entra como respaldo el chiller de compresión de vapor (rosa) abasteciendo del 73% -

76% de la carga, mientras que el equipo de enfriamiento con absorción (azul) suministra de 24% a 27% de la potencia de frío total.

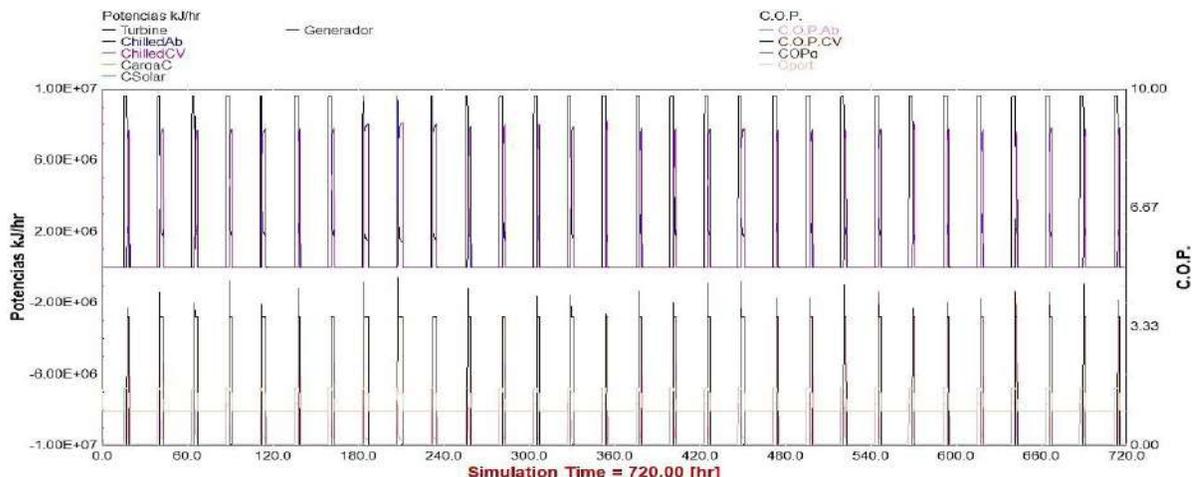


Figura 7. Simulación enfriadores (Absorción y compresión).

Fuente: elaboración autores mediante Trnsys.

La eficiencia de un sistema de refrigeración por absorción está alrededor del 1.2%. Dentro de la figura 8, parte inferior, se observan los coeficientes de desempeño de cada uno de los chillers, el sistema de absorción (color rosa claro) un sistema con un C.O.P de 1.089%, que es muy acertado y apropiado con las curvas de eficiencia que suministraba el fabricante, pues estas curvas estaban simulando la situación más extrema, donde el equipo iba a tener su comportamiento más deficiente, sin embargo, las condiciones de barranquilla no son extremas y el sistema tiene un aprovechamiento interesante de la energía en varios puntos, lo que hace más efectivo el sistema.

a los catálogos suministrados por fabricantes con los desarrollos implementados en los equipos año tras año y a las condiciones de funcionamiento a las que esté trabajando el chiller, es decir varía en función del porcentaje de carga, temperaturas de climatización para el espacio final, condiciones climáticas de la ciudad donde operará el sistema, el tipo de tecnología de compresores del equipo, entre otros: por esto es fundamental analizar el caso puntual de cada proyecto, como se analiza en este trabajo.

3.2.1. Tanques de almacenamiento (Caliente y frío)

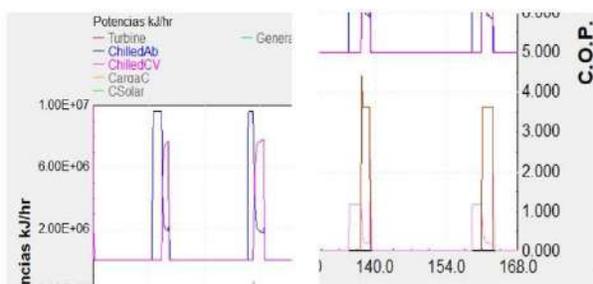


Figura 8. Potencias de frío y Coeficientes de desempeño enfriadores

El C.O.P para el chiller de compresión de vapor (color café) por su parte está entre 4 y 6 de acuerdo

La simulación del tanque de almacenamiento caliente (Figura 9) cumple la condición deseada, la temperatura de la carga está oscilando entre 72°C y 104°C (color naranja), esto demuestra que la carga está presentando valores conforme con el proceso, pues el enfriador de absorción tiene un agua de retorno de 72°C aproximadamente, mientras que el suministro hasta el generador del chiller oscila entre 93° y 98°C. Este comportamiento del agua de proceso puede apreciarse claramente en la gráfica, el agua regresa con menos energía cedida al proceso

y vuelve a aumentarse su temperatura con los picos de demanda energética hasta los valores deseados.

De acuerdo a la carga térmica en el numeral anterior y su comportamiento debido al dispositivo que lo representa, el cual permite un porcentaje de demanda de climatización alrededor del 40%, la potencia en forma de calor suministrada por los paneles solares es de 2.204,9 kW según la simulación, el porcentaje restante es atendido por los gases residuales de la turbina de gas, entre 1200 kW-1400 kW.

En el caso del tanque de almacenamiento de frío, también se obtiene una condición conforme a lo planteado el diseño del distrito térmico propuesto. El agua de suministro de la fuente que es el agua fría, está alcanzando un valor máximo de hasta 6,2°C, lo estipulado está entre 5-6 °C, esto sucede por la estabilidad que otorga el volumen del mismo, es decir que los enfriadores van a trabajar siempre que las temperaturas de los tanques no alcancen los valores deseados. Cuando se generan los picos de demanda térmica la temperatura del tanque tiende a aumentar, sin embargo, en las horas siguientes se controla con la disminución porcentual de la climatización requerida

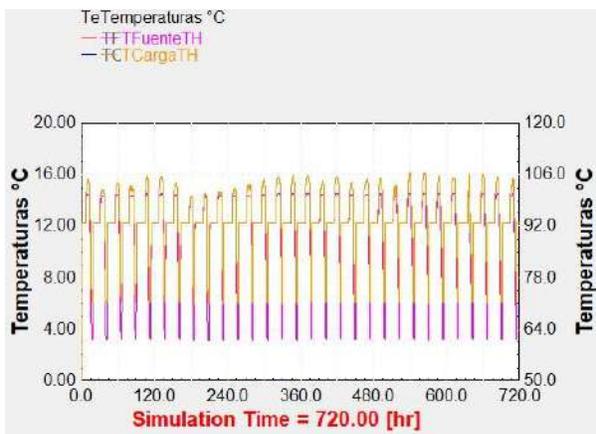


Figura 9. Comportamiento tanque caliente
Fuente: elaboración, la autora con Trnsys

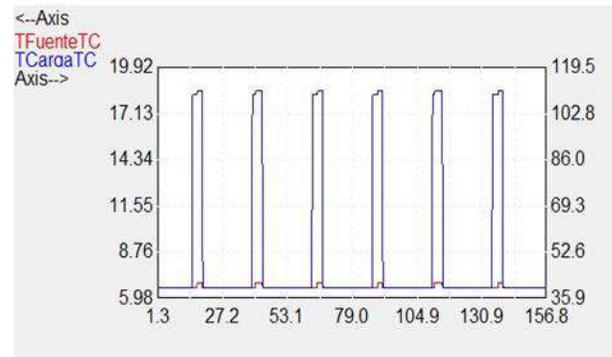


Figura 10. Comportamiento tanque caliente
Fuente: elaboración, la autora mediante Trnsys

En general el suministro energético para un comportamiento del 40% aproximadamente de la carga, correspondiente a de 2687.71 kW, requiere una potencia de aproximadamente 660,98 kW, esto hace que el sistema para esta capacidad tenga un C.O.P. 4,065 cuando ocurre un desequilibrio térmico.

La energía necesaria para la operación del chiller de compresión de vapor de gas es del 27% comparado con la emisión energética del mismo, por su lado el sistema de refrigeración por absorción comprende un gasto energético de 84,4% con relación a la cantidad de energía en forma de calor que suministra.

4. CONCLUSIONES

Se ha implementado satisfactoriamente la lógica de simulación de un distrito térmico mediante la herramienta computacional Trnsys®, integrando el desempeño de los equipos reales por medio de la librería TESS, con resultados aproximados a lo estipulado en los libros de ingeniería de los fabricantes.

El desempeño general del sistema fue calculado con base en el suministro energético requerido y la potencia de frío aportada, obteniendo un desempeño general de 4.065 en el punto de operación explicado en el apartado de análisis y resultados, en ese sentido desempeño del sistema termodinámico planteado por el semillero GIEAUD para el primer concurso de distritos térmicos en

Colombia es una alternativa viable desde el punto de vista energético y operativo, con desempeños esperados dentro de los rangos comercialmente establecidos en por los fabricantes de los equipos.

Dentro del proceso no se contemplaron algunos dispositivos secundarios del diseño inicial, sin embargo, aún sin estos subsistemas integrados que constituyen aproximadamente el 10 % de los equipos que inicialmente propuestos, se logra configurar y obtener una programación, simulación y respuesta del 100% de los elementos contemplados en la interfaz de la herramienta computacional, aportando resultados significativos.

Al distribuir la carga térmica en 8 fábricas de frío se facilita el proceso de simulación, adicional a esto, dado que la demanda de climatización es tan elevada, se proyecta no solo un análisis de comportamiento computacional, sino una sectorización definitiva para instalación y tratamiento, pues la elaboración de un proyecto de la magnitud puede comprometer la viabilidad del proyecto, es decir, si bien es cierto energéticamente el sistema es apropiado, desde otros sectores como desarrollo e instalación del montaje, utilización de la carga otorgada a futuro, mantenimiento y vida útil de los sistemas, entre otros es necesario hacer una evaluación de oportunidad y viabilidad del mismo.

Conforme a lo expuesto dentro del análisis de resultados, la estabilidad del componente (type) que representa la carga térmica se ve afectada por la cantidad de energía manejada, para obtener una respuesta a carga total del sistema termodinámico del distrito, es necesario mejorar la representación de la carga, diseñando una simulación exclusiva para su estimación, pues al ser una demanda energética tan alta se presentan problemas de estabilidad con el calentador auxiliar usado para simular la carga (type 6), el comportamiento no se evidencia estable para valores tan altos de set point de temperatura, esto restringió de cierta manera la simulación, aunque no impidió evaluar el comportamiento de los sistemas.

Con la implementación de los paneles solares en el sistema inicialmente indicados, es posible reducir la capacidad de la turbina de gas, sin embargo si se mantiene la misma turbina, los paneles aportan alrededor de 21,21% adicional de energía térmica al sistema, lo que indica que hay calor residual disponible para implementar otro dispositivo, generando un sistema de trigeneración, lo que apoya la idea inicial del diseño de implementar una turbina de vapor que aumente la oportunidad de generación del sistema, aumentando su eficiencia, pues con la misma entrada se generará electricidad adicional, dado que se necesita la energía solar y la logística del montaje está dispuesta es más útil aprovechar los equipos que de todas formas van a utilizarse para estos fines y generar adicional, que reducir el área de colección.

NOMENCLATURA

SIGLAS

ACAIRE	Asociación Colombiana del Acondicionamiento de Aire y de la Refrigeración
APC	Agencia Presidencial de Cooperación Internacional para Colombia
ASHRAE	La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de refrigeración y aire acondicionado
CIDARE	Centro de investigación de refrigeración y acondicionamiento de aire
COP	Coefficiente de desempeño
COP 21	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2015
COP 25	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2019
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EPM	Empresas públicas de Medellín
GIEAUD	Grupo de investigación de energías alternativas de la universidad Distrital
HVAC	Heating – Ventilation - Air conditioning
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MVCT	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
SECO	Dirección de Cambio Climático, la Embajada de Suiza en Colombia
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética

UTO Unidad Técnica Ozono

SÍMBOLOS

kW Unidad de potencia, [J/s]
BTU Unidad de energía térmica británica
TR Unidad de extracción de carga térmica

REFERENCIAS

ACAIRE: Asociación Colombiana del acondicionamiento del aire y de la refrigeración. Colombia: Acaire, octubre-diciembre, 2016, nro. 64. ISSN 0121-0882.

ACAIRE: Asociación Colombiana del acondicionamiento del aire y de la refrigeración. (2019). Colombia: Acaire, edición especial, 2019, nro. 70. ISSN 0121-0882.

INCOMBUSTIÓN; COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME (Colombia). (2014). Determinación del potencial de reducción del consumo energético en los subsectores manufactureros códigos CIIU 10 a 18 en Colombia. Medellín: UPME. 209 p.

WORLD BANK GROUP, et al. (2016). Energy Supply Situation in Colombia. Colombia: Departamento Nacional de Planeación. 135 p.

WORLD BANK GROUP. COLOMBIA.DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. GREEN GROWTH PARTNERSHIP. ENERSINC. Energy Supply Situation in Colombia. Colombia: Departamento Nacional de Planeación, 2017. 162 p.

XM. (2017). Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado. Colombia. 323 p. 13. [Consultado: 13 de octubre de 2020]. Disponible en: www.xm.com.co/Paginas/Home.aspx

Ingeniería conceptual de un distrito de Enfriamiento en la zona metropolitana de Bucaramanga

Nelson Enrique Palencia Bustos^{1*}; Jorge Andrés Espinel Ramírez²

Daniel Felipe Ramírez Contreras³

¹nelson_palencia@outlook.com; ²Espinel101680@gmail.com; ³danielramirez1499@gmail.com

RESUMEN

Se planea el estudio de ingeniería de detalle de un distrito de enfriamiento en el área metropolitana de Bucaramanga. El documento contiene el inventario de las principales cargas de enfriamiento en el área metropolitana de Bucaramanga y un mapa de calor que permite visualizar la intensidad de la carga térmica, siendo el sector "El Bosque", en Floridablanca el más idóneo para la implementación del distrito. Luego se evidencian los cálculos y criterios tenidos en cuenta para determinar las pérdidas del sistema, así como los equipos a usar y la cantidad que operarán en cada momento de tiempo. El distrito se ejecutará en 3 etapas, donde su radio final será de 2,2 km, beneficiando a 19 usuarios con diferentes actividades económicas. La capacidad instalada es de 13.076 TR, la generación de enfriamiento global es de 81.123.900 TRh/Año, y cuenta con un factor de planta de 70,82%. La central contará en su última fase con 10 equipos de enfriamiento (usando el refrigerante de nueva generación R-1233zd), 8 torres de enfriamiento, 13 bombas para el sistema de bombeo de la red de distribución y 21 bombas para el sistema de bombeo de las torres de enfriamiento. Para finalizar, el estudio demuestra que es factible el desarrollo de un distrito en la zona planteada ya que la zona presenta todos los factores idóneos para la implementación de este tipo de soluciones junto a actores interesados con objetivo en común.

ABSTRACT

The detailed engineering study planning of a cooling district in the metropolitan area of Bucaramanga is shown. The document contains the inventory of the main energy cooling loads in the metropolitan area of Bucaramanga and a heat map that allows visualizing the intensity of the energy thermal load, being the "El Bosque" area, in Floridablanca the most suitable for the implementation of the district. The calculations and criteria considered are shown to determine the losses of the system, as well as the equipment to be used and the amount that will operate at each moment of time. The district will be executed in 3 stages, where its final radius will be 2.2 km, benefiting 19 users with different economic activities. The installed capacity is 13,076

¹ Universidad autónoma de Bucaramanga; Ingeniero en Energía, Egresado Madrid, España; +34 643033050, nelson_palencia@outlook.com

² Universidad autónoma de Bucaramanga, Ingeniero en Energía, Egresado Bucaramanga, Colombia; +57 3106170066, Espinel101680@gmail.com

³ Universidad autónoma de Bucaramanga, Ingeniero en Energía, Estudiante Bucaramanga, Colombia +57 3166170910, danielramirez1499@gmail.com

TR, the global cooling generation is 81,123,900 TRh / Year, and has a capacity factor of 70.82%. The plant will have in its last phase 10 cooling equipment (using the new generation R-1233zd refrigerant), 8 cooling towers, 13 pumps for the distribution network pumping system and 21 pumps for the pumping system of cooling towers. To conclude, the study shows that the development of a district in the proposed area is feasible since the area presents all the ideal factors for the implementation of this type of solutions together with stakeholders with a common objective.

Palabras Clave: Distritos térmicos, enfriamiento, redes de calor, cambio climático, carga de enfriamiento

INTRODUCCIÓN

Los fuertes cambios climáticos han generado una necesidad de climatización en recintos, especialmente de enfriamiento para zonas tropicales, debido al incremento de la temperatura global. Específicamente en Colombia, el IDEAM revela un escenario donde existirá un incremento de la temperatura media anual de 2,14 °C para el 2100 en caso de que los niveles de gases de efecto invernadero continúen aumentando sin ningún control o gestión de los mismos. (SIAC, 2019). Para el año 2012, las emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia estuvieron alrededor de 190 MtCO₂eq. La preocupación aumenta al conocer que Santander genera alrededor de 14,38 MtCO₂eq lo que lo clasifica en el puesto 5 a nivel nacional. (MINAMBIENTE, 2014). Gracias a que la iniciativa DT en Colombia ha tenido éxito en lograr disminuir los GEI, reducir la carga instalada de refrigerantes y generar ahorros energéticos. Esto es evidente en el DT piloto construido en la ciudad de Medellín donde la reducción del consumo de energía fue del 31%, las emisiones de GEI disminuyeron en un 22%. (Unidad Técnica del Ozono, 2014). Por lo tanto, el presente artículo se enfoca en caracterizar la demanda de enfriamiento de los principales sectores económicos del área metropolitana de Bucaramanga, donde además se concentra una alta participación en emisión de gases GEI, con ellos se pretende obtener los comportamientos de consumo de energía eléctrica en los sistemas de aires acondicionados, los cuales posteriormente serán la materia prima para el dimensionamiento de un distrito térmico cercano a los usuarios potenciales.

1. METODOLOGÍA

1.1. Definición de potenciales zonas para el suministro de frío

Inicialmente, se identifica los usuarios potenciales en el área metropolitana de Bucaramanga. En el inventario se enlista un total de 109 usuarios potenciales de diferentes sectores de la economía: salud, comercial, financiera, educacional, hotelero, administrativos privados y del estado, y entre otros. El siguiente paso consiste en determinar las áreas climatizadas de los usuarios, información obtenida mediante la modalidad de visitas, combinada con la validación de la superficie determinada mediante la herramienta de Google Maps. Posteriormente, se calculan las cargas térmicas mediante factores de carga definidos por tipo de actividad económica. Algunos usuarios accedieron a realizar una encuesta para inventariar su carga térmica instalada y entre otros datos de valor para el estudio. Del inventario de cargas realizado, Bucaramanga cuenta con el 77% de los usuarios totales enlistados mientras que los municipios de Floridablanca y Piedecuesta con un 22% y 1%, respectivamente. Sin embargo, al relacionar la carga térmica en total, se pudo identificar un potencial de enfriamiento en el área metropolitana de Bucaramanga de 33.989 TR, donde, Bucaramanga posee el 48% de la carga de enfriamiento total determinada en el inventario, Floridablanca un 39% y Piedecuesta 13%.

A continuación, se observa en la figura 1 el mapa de calor del área metropolitana de Bucaramanga, donde se aprecia que Bucaramanga pese a tener un porcentaje significativo de los usuarios enlistados en este estudio no logra diferenciarse en gran medida respecto al municipio de Floridablanca, quien con tan solo 22 usuarios logra disminuirla brecha de ambos

municipios reduciendo la diferencia porcentual de la capacidad de carga térmica a un 9% respecto Bucaramanga. Adicionalmente, Floridablanca, logra

acumular el 80% de la demanda térmica con tan solo 9 de sus usuarios.

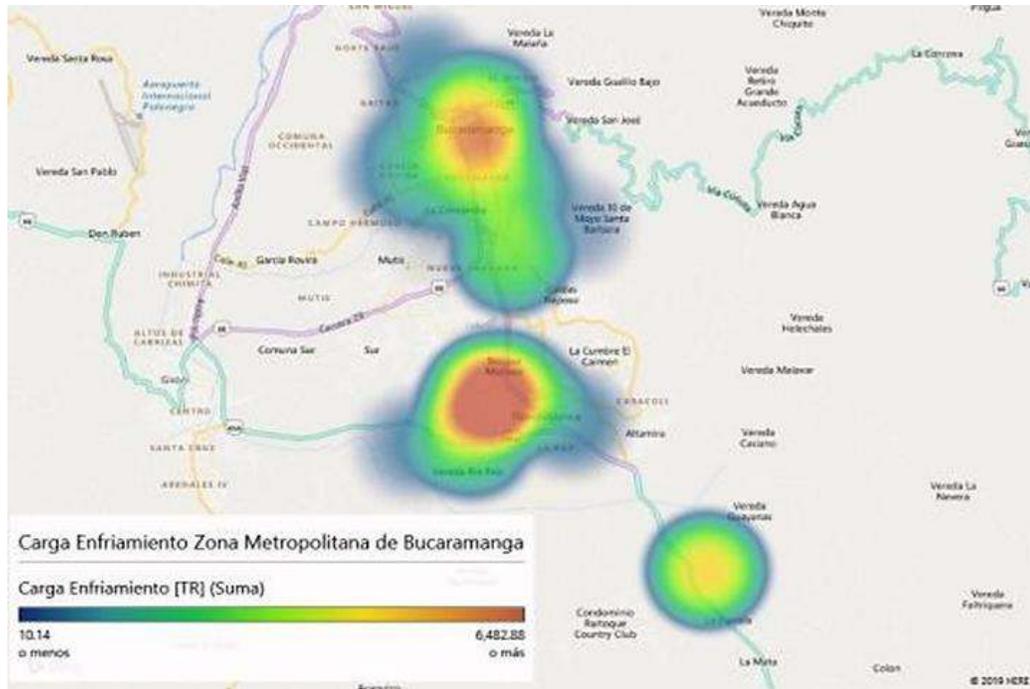


Figura 1. Mapa de calor, zona metropolitana de Bucaramanga

Los mapas de calor son esenciales para la determinación de áreas potenciales para el desarrollo de los distritos térmicos. Por esta razón, y debido a que Colombia no cuenta actualmente con mapas de calor de carga térmica, el inventario y toda la información procedente del tratamiento de los datos era vital para el estudio. Gracias a dicho mapa, es posible identificar donde se localiza la mayor demanda de enfriamiento, y, también reconocer en que zonas se focalizan. La cercanía entre los usuarios es un factor esencial para la implementación del distrito.

Haciendo uso del mapa de calor, se define que, el sector de El Bosque en Floridablanca es el lugar más idóneo para el desarrollo de un distrito de enfriamiento, siendo la localización con mayor densidad térmica no solo del municipio sino del área metropolitana. El Bosque es un barrio residencial rodeado de centros hospitalarios, universidades, centros comerciales y supermercados de gran

superficie ubicada geográficamente al occidente de Floridablanca. Del análisis realizado, fueron seleccionados 19 de 22 usuarios para su integración en el estudio del distrito de enfriamiento, los cuales fueron sometidos a estudio para conocer su carga de enfriamiento, definida como:

$$Q_i = A_c * P * FC \quad [1]$$

Los factores de carga de enfriamiento varían según el tipo de actividad económica, por esta razón y debido a que, las edificaciones no cuentan con estudios detallados de diseños de su sistema climatización, se hará uso inicial de los factores ofrecidos por la ASHRAE.

La implementación de este distrito está dividido en 3 etapas, la primera (radio de 0,4 Km) cuenta con 7.027.59 TR, la segunda (radio de 0,8 km) con 9.593 TR y la tercera con una capacidad total de 13.076 TR (radio de 2,2 km). Se aclara que la etapa 3 contempla las otras dos etapas iniciales.

Tabla 1. Capacidad de enfriamiento por cada usuario

PRIMERA ETAPA		SEGUNDA ETAPA		TERCERA ETAPA	
EMPRESA	CARGA (TR)	EMPRESA	CARGA (TR)	EMPRESA	CARGA (TR)
Foscal Internacional	3.562,40	Caracolí	890,00	Makro	125,00
Foscal	1.591,15	Cañaveral	568,40	Floridablanca	
Carlos Ardila Lulle	640,00	La florida	268,91	Alkosto	254,69
Fundación Cardiovascular	500,00	Jumbo Cabecera	194,03	Ecoparque Natura	2.300,00
Unab el Bosque	300,00	Sonesta	333,93	Zona Franca	521,82
Metro Cañaveral	122,35	Roseliere	156,18	Tigo - UNE	150,00
Más X Menos Cañaveral	12,01	Movistar Cañaveral	39,87		

1.2. Curva de demanda que seguirá el distrito y Cálculo de la capacidad de generación de la central.

Para construir la curva de demanda, se asume un factor de ganancia de calor del 5% (tomado en base al Consejo de Construcción Verde de los Estados Unidos de Norteamérica, para sistemas de distribución de agua fría). Luego, se realiza una sumatoria de la multiplicación del valor en por unidad en cada instante de tiempo de cada usuario por su respectiva carga de enfriamiento, obteniendo como resultado el comportamiento global horario del distrito de enfriamiento en TR.

$$Q_{\text{distrito},i} = \sum Q_j * qu_{j,i} * 1,05 \quad [2]$$

La carga de enfriamiento se toma de manera individual y para instante de tiempo, es un valor adimensional y es propio de cada usuario en un instante de tiempo específico. Esta curva o perfil representa el comportamiento global de la demanda y brinda información acerca de la cantidad de toneladas que se deben generar en la planta cada hora para satisfacer a todos los clientes del distrito.

La capacidad de generación anual de la planta en términos de TRh/año se calcula con la carga de enfriamiento por usuario por los 365 días del año, y finalmente es posible calcular el factor de planta del distrito

$$Q_{\text{distrito}} = \sum_{i=1}^{24} Q_{\text{distrito},i} * 365 \quad [3]$$

$$FT = \frac{Q_{\text{Distrito}}}{Q_{\text{MAX}_{\text{distrito},i}} * 8760} \quad [4]$$

Con base a la información anterior se grafica la curva de comportamiento (operación) global del distrito, y la capacidad máxima instalada, la cual será de 13.076,1881 TR, una generación anual de 81.123.900,44 TRh y un factor de planta de 70,82% (Figura 2)

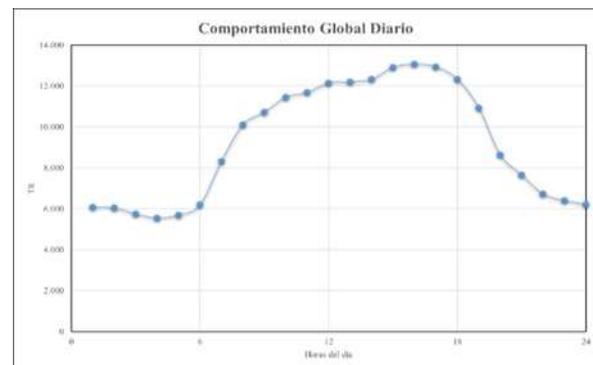


Figura 2. Curva e n magnitud del comportamiento del distrito térmico

1.1. Selección de equipos de enfriamiento

Debido a que la zona donde se encuentra el distrito no posee potencial de recuperación de calor residual y cuenta con alta confiabilidad en el suministro de energía eléctrica, el equipo que será capaz de alcanzar el objetivo del distrito será aquel que por sus características disminuyan costos de operación y mantenimiento, cuente con rodamientos magnéticos, los cuales eliminan la

fricción que se presenta en equipos con rodamientos convencionales, no necesite lubricantes, además este enfriador use como fluido de trabajo el refrigerante R-1233zd (HFO, hidrofluoroolefinas) el cual cuenta con PAO igual a 0 y PCG igual a 1, beneficiando el medio ambiente en cuestión de emisiones. Además, para su funcionamiento óptimo se establece la velocidad de diseño en el distrito de 2,1 m/s, estando dentro del Intervalo permitido de velocidades recomendadas para fluidos de servicio general proporcionado por la ASHRAE.

1.2. Cálculos de flujos de agua requerido por el sistema de distribución

Conocer las características del sistema de distribución es importante ya que esto permitirá identificar los equipos de bombeo más adecuados para implementar en el mismo sistema de distribución, razón por la cual se comienza determinando los flujos volumétricos que requiere cada usuario para lograr proporcionarle su carga térmica previamente calculada. Estos cálculos se realizan para el instante de tiempo donde el distrito opera a su máxima capacidad ya que tanto el sistema de bombeo como las líneas de transporte deben tener disponibilidad para cada uno de los puntos de operación del distrito.

$$V_{distribución,i} = \frac{Q_{distrito,i}}{C_p@T=9.4 * (T_{ie} - T_{oe}) * \rho@T=9.4} \quad [5]$$

Donde,

V es el flujo volumétrico a máxima capacidad del usuario

C_p es el calor específico de transporte

ΔT es la reducción de temperatura esperada

El sistema de distribución está compuesto por 2 líneas principales identificadas como línea A y B. Una vez ramificado el sistema de distribución, se identificaron una serie de particiones denominadas nodos, los cuales hacen referencia a los vértices de las tuberías del sistema de distribución, es decir, en cada nodo hay una o varias bifurcaciones hacia uno o más usuarios. Para facilitar la comprensión de esta distribución se proporcionan los siguientes mapas

donde se evidencian tanto los nodos como las líneas de distribución y los usuarios que se conectan a los mismos



Figura 3. Recorrido línea A de distribución

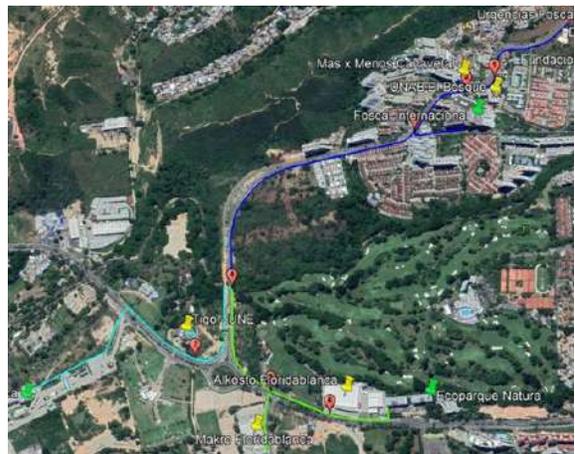


Figura 4. Recorrido línea B de distribución

En este punto se conoce los flujos volumétricos que pasan por cada uno de los tramos y nodos del sistema de distribución, por lo que ahora se procede a calcular los diámetros de cada tramo del sistema. La metodología consiste en calcular primero el diámetro que debería tener la tubería en cada uno de los tramos garantizando la velocidad de diseño previamente definida y teniendo presente los respectivos flujos de cada tramo.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 * v_{tramo}}{\pi * V_d}} \quad [6]$$

D_i es el diámetro de cada tramo en m, V es el flujo por cada tramo en m^3/s . Una vez calculado los diámetros de cada uno de los tramos del sistema de distribución entonces se procede a definir el diámetro real que se usara en el proyecto ya que los diámetros previamente calculados son solo una referencia para posteriormente identificar el diámetro comercial más optimo.

Una vez seleccionados los diámetros más próximos a los diámetros de referencia entonces se calcula la velocidad real que tendría el fluido y en caso de que se encuentre entre un rango considerado como rango de seguridad, es decir, que la velocidad no supere en el mejor peor de casos un 140% de la velocidad de diseño entonces se fija el diámetro.

$$V_r = \frac{\dot{V}_{Tramo}}{\frac{\pi * D^2}{4}} \quad [7]$$

Donde, D_r es el diámetro real que se encuentra comercialmente en cada tramo en m, V_r es la velocidad recalculada con el nuevo diámetro en m/s y V es el flujo por cada tramo en m^3/s . Este proceso es iterativo hasta que el diámetro final sea menor posible, logrando así reducir costos de inversión del sistema de tubería, garantizando una velocidad cercana a la de diseño de 2,1 m/s, pero sin exceder 3 m/s.

Este proceso se realiza para tuberías de polietileno de alta densidad DR 13,5 y sin aislamiento. Este tipo de materiales el más implementado por este tipo de industrias ya que cuenta con coeficientes de transferencia de calor relativamente bajos, es decir que por sí mismo ya es bastante aislante, y cuenta con un factor de rugosidad igualmente bajo lo que minimiza las pérdidas hidráulicas que puedan presentarse. En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para cada línea de distribución:

Tabla 2. Caracterización de los nodos en las líneas A y B

Tramo	Diámetro	Flujo	Diámetro Real	Velocidad	Diámetro	Flujo	Diámetro Real	Velocidad
	(mm)	(m^3/s)	(mm)	(m/s)	(mm)	(m^3/s)	(mm)	(m/s)
0 - 1	708,984	0,829	643,366	2,558	828,417	1,132	770,788	2,426
1 - 2	446,522	0,329	385,42	2,819	811,123	1,085	770,788	2,326
2 - 3	550,706	0,500	513,842	2,412	810,416	1,083	770,788	2,321
3 - 4	494,794	0,404	428,244	2,803	562,737	0,522	513,842	2,519
4 - 5	482,999	0,385	428,244	2,671	503,165	0,418	471,018	2,396
5 - 6	346,841	0,198	428,244	2,811	491,317	0,398	428,244	2,764
6 - 7	336,139	0,186	299,771	2,640	251,987	0,105	230,175	2,517
7 - 8	242,331	0,097	299,771	2,328				
8 - 9	201,083	0,067	230,175	2,490				

1.3. Pérdidas del sistema de distribución

Para efectos del dimensionamiento se usan intercambiadores de tubo y carcasa por su baja caída de presión, definiendo que el fluido del distrito se transportara por los tubos del intercambiador. Además, se define la caída de presión por tubos del intercambiador en 0,7 kg/cm² o 7 m de pérdida con base a la caída de presión máxima establecida en el documento Diseño Efectivo de Intercambiadores de Tubo y Carcasa

basado en TEMA. ("Effectively Design Shell and Tube Heat Exchangers," 1998).

Las pérdidas totales del sistema de distribución se determinan primero calculando las pérdidas en cada uno de los tramos, estas pérdidas son llamadas pérdidas del circuito en serie, posteriormente se calculan las pérdidas entre los nodos de cada uno de los usuarios y a estas pérdidas se les llama pérdidas en paralelo. Luego, se suman las pérdidas en serie y a estas se agrega la mayor de las pérdidas en paralelo. Finalmente, se agregan las pérdidas en el intercambiador y en accesorios.

$$H = 2 * \left(\sum h_{Lserie} + h_{Lparalero} \right) + 7 + h_t \quad [8]$$

Para el caso de este sistema donde el distrito se encuentra en el punto más alto y debido a que es un ciclo, las pérdidas estáticas son nulas ya que la energía requerida para volver después de pasar por él se compensa con la que gana el fluido cuando ir allí debido a la gravedad.

A continuación, se presenta el perfil de elevación desde el distrito de enfriamiento hasta el usuario más bajo de la línea A, hotel Roseliere. (Figura 5). Así como el perfil de elevación desde el distrito de enfriamiento hasta el usuario más bajo de la línea B, zona franca. (Figura 6).



Figura 5. Perfil de desnivel, línea A



Figura 6. Perfil de desnivel, línea B

Como resultado de este análisis, se obtuvo unas pérdidas para la línea A de 52,4466 metros, y para la línea B, 58,7751 metros. Estas pérdidas tienen en cuenta el trayecto de ida y vuelta, accesorios y las pérdidas en el intercambiador. Estas pérdidas son de vital importancia al momento de seleccionar las bombas para el sistema de bombeo.

1.4. Selección de torres de enfriamiento

Se usa como primera referencia la cantidad de calor que puede retirar, la siguiente característica son los rangos de capacidad de flujo que dicha torre puede manejar para lograr el retiro de calor de diseño. Además, se usa un 25% más de la capacidad instalada para garantizar las condiciones de operación de los equipos de enfriamiento.

1.5. Selección de bombas para la operación del distrito

Una vez determinada las pérdidas dinámicas del sistema de distribución de agua de enfriamiento, se hace uso de las curvas características de bombas centrífugas que junto a la curva de carga del sistema brindan el punto de operación en el cual funcionara el sistema de bombeo. La selección de la bomba se realiza con la herramienta de selección de bombas de Grundfos, empresa especializada en bombas.

1.6. Cantidad de equipos requeridos

Para este proceso se identifica en la curva de operación del distrito el punto de mayor demanda de enfriamiento, el cual también es el de mayor demanda de flujo. Una vez identificado el punto de

mayor demanda se selecciona la unidad de trabajo, es decir, para equipos de enfriamiento se trabaja con mayor demanda de enfriamiento, las bombas trabajan con el flujo y para las torres la demanda de enfriamiento. Por último, se divide la cantidad anterior en la capacidad nominal del equipo seleccionado.

$$N_e = C_{max} * C_{Ne}(30) \quad [9]$$

Donde, C_{max} es la capacidad máxima de operación, C_{Ne} es la capacidad nominal de los equipos y N_e es el número de equipos necesarios para la correcta operación. De acuerdo con los parámetros anteriores, la selección de los equipos se detalla en la siguiente tabla, así como sus características óptimas de operación para el distrito.

Tabla 3. Equipos pertenecientes al distrito térmico

CONCEPTO	No DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN
Equipo De Enfriamiento	10	<ul style="list-style-type: none"> Refrigerante R-1233zd Velocidad de Diseño de 2,1 m/s. Presión de Operación tanto en el evaporador como en el Condensador de 1034 kPa
Torres De Enfriamiento	8	<ul style="list-style-type: none"> Dimensiones: 8x8 Metros y altura De 8,5 mts. Capacidad de 2.150 TR Rango de Caudal de Agua entre 650-1.800 m³/h Potencia Requerida debido al Ventilador 74,57 kW
Bomba Centrífuga	13	<ul style="list-style-type: none"> Potencia Requerida de 105,6 kW Velocidad Angular de 1.750 Rpm Eficiencia de 81,4% Rodete de Diámetro 368
Bomba Centrífuga		<ul style="list-style-type: none"> Potencia Requerida De 118,1 kW Velocidad Angular de 1.750 Rpm Eficiencia de 82,9% Rodete de Diámetro 382
Sistema De Bombeo De Las Torres	21	<ul style="list-style-type: none"> Bomba y Motor con Variador de Frecuencia Eficiencia de 80,8% Requerimiento de 13,98 W Velocidad de Operación de 1.750 Rpm

1.1. Energía requerida por los equipos

Para los equipos de enfriamiento de este trabajo se toma como condiciones de operación una carga de 100% y temperatura de entrada al condensador de 85 F, lo que da como resultado una eficiencia de 0,53 kW/TR. Por lo tanto, la ecuación para conocer el consumo de energía anual es:

$$E_{\text{enfriador}} = Q_{\text{distrito}} * \rho_{100\%@T=29^{\circ}\text{C}} \quad [10]$$

El cálculo del consumo de energía anual es genérico para los otros equipos, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$E_x = \sum_{i=1}^{24} P_x * N_{x,i} * 365 \quad [11]$$

Donde, N_x es la cantidad de equipos funcionando horariamente durante un día, además, se multiplica por 365 días para obtener así la energía anual. Ver Figura 7

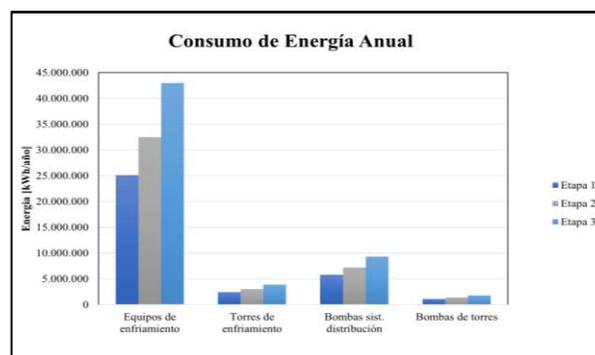


Figura 7. Consumo anual de energía eléctrica en cada etapa

Una vez determinado estos consumos de energía se puede calcular el rendimiento promedio general de la planta cuando se alcanza el régimen en la última etapa:

$$\eta_{\text{Distrito}} = \frac{57946081.83 \text{ kWh/año}}{81123900.44 \text{ TRh/año}} = 0.7142 \frac{\text{kW}}{\text{TR}} \quad [12]$$

2. CONCLUSIONES

Los mapas de calor son una herramienta esencial para la determinación de zonas potenciales ya que permiten identificar que tan focalizada se encuentran las cargas térmicas.

Al momento de realizar el acercamiento con las empresas para realizar una encuesta sobre su sistema de enfriamiento, se percibió que el personal encargado contaba con interés en la participación de este tipo de proyectos, sin embargo, era complicado escalar la propuesta a la persona adecuada para la solicitud de permisos.

El distrito el bosque cuenta con una ubicación privilegiada ya que a menos de 800 m de radio logra aparcarel 73% de la carga térmica estimada.

El índice de desempeño energético del distrito el bosque se encuentra en un rango bastante bueno ya que sin contar con tanques de almacenamiento ni fuentes energéticas secundarias como fotovoltaica o recuperación de calor, logra competir al menos en diseño con los índices de desempeño de otros distritos

NOMENCLATURA

SIGLAS

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

DT	Distrito Térmico
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HFCs	Hidrofluorocarburos
HFO	Hidrofluoroolefinas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
PAO	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono
PCG	Potencial de Calentamiento Global
TEMA	Asociación de Manufactureros de Intercambiadores Tubulares

SIMBOLOS

Qi	Demanda de enfriamiento por usuario [TR]
Ex	Energía anual consumida por los equipos restantes [kWh/año]
Px	Potencia eléctrica del equipo [kW]
P	Densidad del fluido [kg/m ³]
Ac	Área de climatización [m ²]
P	Cantidad de pisos
FC	Factor de carga [TR/m ²]
Vd	Velocidad de diseño [m/s]

REFERENCIAS

- SIAC. (2019). Escenario de cambio climático.
- MinAmbiente. (2014). Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración.
- Unidad Técnica del Ozono. (2014). Boletín N°. 35 del programa ambiental y energético del uso de aire acondicionado en edificaciones.
- UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017-2022. Ministerio de Minas y Energía, 1–157.
- ASHRAE. (2019). District cooling guide second edition.
- NASA. (2019). Global climate change data and facts.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. Ocean-atmosphere CO₂ exchange.
- IDEAM. (2016). INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES EFECTO INVERNADERO - DE GASES EFECTO.
- Stojkov, M., Hnatko, E., Kljajin, M., & Hornung, K. (2011). CHP and CCHP Systems Today. 75–79.
- D. A. A. Olama. (2017). Guía teórica y práctica de distritos de enfriamiento.
- USGBC. (2010). Treatment of District or Campus Thermal Energy in LEED V2 and LEED 2009-Design & Construction. 29.
- Effectively Design Shell and Tube Heat Exchangers. (1998). Chemical Engineering Progress

Dimensionamiento, viabilidad y optimización energética de los distritos térmicos de enfriamiento a partir del comportamiento de la demanda e implementación del tanque de almacenamiento de energía térmica

Ricardo Chegwin^{1*}; Andrés Padilla²; Natalia Algarin³
María Consuegra⁴; Iván Tovar⁵

¹*Ricardo.chegwin@uac.edu.co*; ²*Andres.padilla74@uac.edu.co*; ³ *Natalia.algarin@uac.edu.co*

⁴*Maria.consuegra1@uac.edu.co*; ⁵*Ivan.Tovar@uac.edu.co*

RESUMEN

La demanda de climatización se ha incrementado drásticamente en las últimas décadas, desplegando significativamente el uso de la energía térmica. La implementación de los TES (sistemas de almacenamiento de energía térmica), normalmente se da para almacenar energía térmica cuando la tarifa del servicio de electricidad y la demanda térmica de las edificaciones es más baja, para luego ser descargados durante los periodos de alta demanda. En la presente investigación se analiza la viabilidad del uso de los TTES (tanques de almacenamiento de energía térmica) a partir de las condiciones ambientales, perfil de demanda, tamaño del distrito y escenarios de operación. Para el análisis y evaluación técnica-económica se implementó un algoritmo que permitiese el cálculo multifactorial de variables de manera iterativa, determinando la capacidad instalada, viabilidad económica, desempeño e impacto ambiental del distrito térmico con TTES. Se determinó que, aunque no exista una variación en la tarifa de electricidad, el TTES puede ser viable, con paybacks menores de 10 años, a partir de distritos con capacidad de 7000 TR para el sector residencial en las ciudades de Barranquilla, Cali y Medellín, y a partir de 13000 TR para Bogotá, con ahorros de energía desde el 11% al 25% y ahorros por operación y mantenimiento (O&M) desde el 6% al 50% en comparación a un sistema convencional.

¹ Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia
Ricardo.chegwin@uac.edu.co

² Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia
Andres.padilla74@uac.edu.co

³ Programa de ingeniería Mecatrónica; Universidad Autónoma del Caribe; Facultad de Ingeniería; Barranquilla, Colombia;
Natalia.algarin@uac.edu.co

⁴ Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia
Maria.consuegra1@uac.edu.co

⁵ Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia
Ivan.Tovar@uac.edu.co

ABSTRACT

The demand for air conditioning has increased dramatically in recent decades, significantly expanding the use of thermal energy. The implementation of TTES (thermal energy storage tanks), normally occurs to store thermal energy when the electricity service rate and the thermal demand of the buildings is lower, to later be discharged during demand peaks. In the present work, the feasibility of using the TTES is analyzed based on the ambient conditions, behavior of the cooling profile, different peak demands and different operating scenarios for tank loading through the implementation of an algorithm that allows the calculation and the multifactorial evaluation of variables in an iterative manner, allowing to establish the installed capacity, performance and environmental impact of the thermal district when implementing the TTES. It was determined that, although there is no variation in the electricity rate, the TTES may be viable, with paybacks under 10 years, from districts of 7000 TR for the residential sector in the cities of Barranquilla, Cali, and Medellin, and from 13000 TR for Bogota, with energy savings from 11% to 25% and savings for operation and maintenance (O&M) from 6% to 50% compared to a conventional system.

Palabras Clave:

TES (Sistema de almacenamiento térmico), perfil de demanda, O&M (Costos de Operación y Mantenimiento), Chillers (Enfriadores de Agua), emisiones (Generación de gases efecto invernadero, CO₂).

INTRODUCCIÓN

El sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) se refiere al almacenamiento de energía (de forma sensible o latente) durante un periodo de tiempo en un medio de almacenamiento, permitiendo equilibrar el desajuste entre la demanda y el suministro de calefacción o refrigeración, compensando las diferencias en el tiempo y magnitud de la producción de calefacción o refrigeración. Los TES pueden ayudar a mejorar el rendimiento del sistema, suavizando la oferta, demanda y fluctuaciones de la temperatura del sistema, así como mejorando la confiabilidad de la fuente de calefacción y / o refrigeración (Delta Energy & Environment Ltd, 2016). Cuando se trata de distritos térmicos de enfriamiento, los TES emplean tanques térmicamente aislados que almacenan agua enfriada durante el periodo en el que la demanda de energía del distrito es baja, usualmente durante la noche. Los sistemas TES más empleados en los distritos térmicos de enfriamiento son los de energía sensible, los cuales basan su funcionamiento en el diferencial de temperatura entre el agua de suministro y el retorno, estratificando las temperaturas por medio de la variación de la densidad del fluido al interior del

depósito y almacenando la energía térmica en forma de calor sensible del agua.

La operación de estos sistemas inicia cuando la demanda de energía del distrito es baja, quedando un excedente para que los sistemas de enfriamiento disponibles (chillers), suministren agua enfriada al tanque. Estos son luego descargados durante el periodo de alta demanda de energía. Implementar el tanque de almacenamiento térmico (TTES) conlleva a varias ventajas, pero la principal es cuando se cuenta con tarifas eléctricas variables, permitiendo cargar el TTES en las horas de tarifa baja (Zhang et al., 2010). Otras de las ventajas de la implementación del TTES es la reducción de la capacidad instalada de chillers y por consiguiente de los costos de mantenimiento, resultado de disminuir el pico de demanda. Aunque el TTES requiere de una inversión adicional de capital, esta puede ser menor en casos donde se tengan grandes distritos de enfriamiento, debido a la económica de escala al aumentar el tamaño del TTES y al ahorro logrado al reducir la capacidad instalada de chillers con respecto al sistema convencional. Otro beneficio es el relacionado con la eficiencia energética, ya que, si el perfil de demanda del distrito permite almacenar energía durante la noche, se aprovecha la mejora en la eficiencia

energética de los chillers debido a que, a bajas temperaturas ambiente, el consumo de energía requerido por los compresores y el sistema de condensación del gas refrigerante disminuye. Esta reducción en la cantidad de energía eléctrica consumida conlleva además a la reducción de las emisiones de CO₂. El TTES también mejora la flexibilidad operacional de todo el sistema, alargando además la vida útil de los chillers, pues trabajan a carga constante independiente del perfil de demanda de enfriamiento (ASHRAE, 2019).

En los estudios de los casos de implementación del TES, se pudieron identificar diferentes porcentajes de ahorro acorde con los tipos de energía primaria empleada, condiciones ambientales, estrategia de operación del sistema (almacenamiento total o parcial), pero generalmente el porcentaje de reducción de energía con respecto a un sistema convencional sin TTES está entre el 3-40% (Biyanto et al., 2015; Mohamed and Almarshadi, 2017; Glazer, 2019). Aun con los beneficios mencionados anteriormente, los TTES requieren de un estudio de viabilidad económica para cada proyecto en particular, ya que, dependiendo de la capacidad del distrito, la inversión en un TTES puede no ser económicamente viable. Aun cuando el incentivo principal del uso del TES es cuando se tiene una tarifa variable de electricidad, en lugares donde la tarifa es constante puede haber un ahorro económico importante en el caso en que exista ya sea incentivos económicos o grandes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche (Al Quabeh et al., 2020).

El objetivo de la presente investigación es analizar la viabilidad económica del tanque de

almacenamiento térmico en distritos térmicos de enfriamiento en Colombia, país donde aún no existe una variación de la tarifa eléctrica durante el día e incentivos importantes para el uso de esta tecnología de almacenamiento. Para el análisis de la viabilidad se consideran tres escenarios de operación correspondientes a: 1) un distrito térmico sin TTES, 2) un distrito térmico con TTES funcionando con chillers trabajando a carga constante y 3) un distrito térmico con TTES funcionando con dos conjuntos de chillers, unos para la carga del TTES y otros para el suministro directo al distrito.

Para cada escenario se desarrolla un algoritmo en Python que permite la evaluación multifactorial de variables de manera iterativa, permitiendo establecer la capacidad instalada de chillers, capacidad del tanque, desempeño, ahorros e impacto ambiental del distrito térmico.

1. METODOLOGIA

Para la determinación de la viabilidad económica del TTES, se analiza su implementación en diferentes tamaños de distritos, con capacidades de enfriamiento desde 1000 TR hasta distritos de 100,000 TR y ubicados en diferentes ciudades, mediante la utilización de un algoritmo realizado en Python. El perfil de demanda se construye para el sector residencial de las ciudades de Barranquilla, Medellín, Cali y Bogotá. Este perfil es calculado con el software CHVAC -Elite y se muestran en la figura 1.

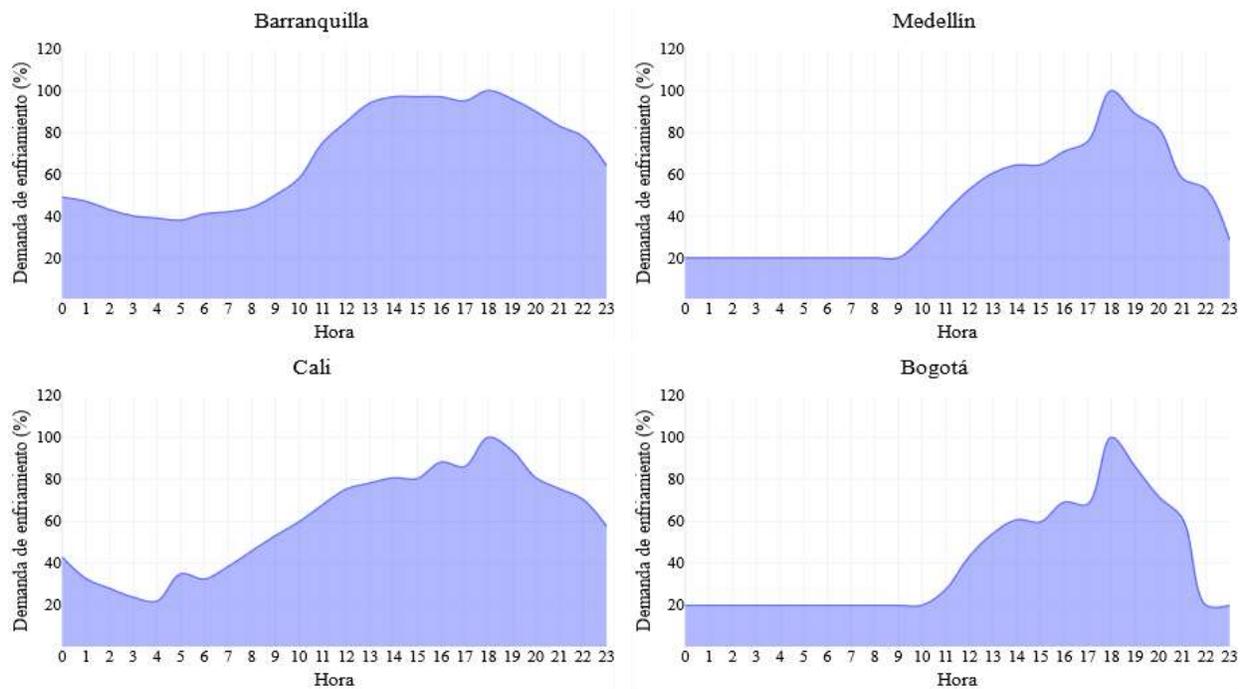


Figura 1. Perfil de demanda del sector residencial en diversas ciudades.

Fuente: Los autores

Para cada tamaño de distrito, el algoritmo itera sobre una lista de chillers de velocidad variable y condensación de refrigerante por aire, cada uno con eficiencias (kW/TR) y capacidades (TR) diferentes, desde 100 TR hasta 550 TR. La elección del uso de chillers condensados por aire con respecto a condensados por agua es reducir el impacto ambiental derivado por el consumo de agua por evaporación en las torres de enfriamiento. Las eficiencias especificadas por el fabricante de estos chillers condensados por aire están dadas para una temperatura de entrada y salida del agua del evaporador de 12°C y 7°C respectivamente, y con una temperatura de condensación de 35°C. Para la lista de chillers disponibles, estas eficiencias, a carga total, varían entre 1.08 – 1.36 kW/TR.

El algoritmo de optimización determina la capacidad instalada de chillers, capacidad del tanque de almacenamiento, costos de inversión, costos de operación y costos asociados al O&M para cada tamaño de distrito. El dimensionamiento preciso de los chillers y del tanque de almacenamiento requiere de un análisis detallado

de la eficiencia combinada de todos los componentes del sistema, incluidas las bombas y fan coils, para cada hora del día debido a la variación de la demanda de refrigeración y condiciones climáticas exteriores. Esto último debido a que la eficiencia y consumo de energía de un chiller depende tanto de la temperatura de entrada y salida del agua del evaporador como de la temperatura de condensación (y en consecuencia de la temperatura de bulbo húmedo, en el caso de los chillers enfriados por agua, o de la temperatura de bulbo seco en el caso de chillers enfriados por aire). Además, las temperaturas anteriores también influyen en el flujo de agua tanto en el circuito de distribución de agua helada como en el circuito de condensación (este último solo en el caso del chiller enfriado por agua), afectando a su vez a otras variables como el consumo de energía en las bombas y el dimensionamiento de las tuberías. El comportamiento e interacción de dichas variables requiere de softwares de modelación especializados para obtener resultados detallados de los consumos de energía para cada componente al cambiar alguna variable, por ejemplo, la disminución de la

temperatura de salida del agua del evaporador conlleva a un aumento del trabajo de compresor, esta disminución provoca un aumento del delta de temperatura del agua de retorno, reduce el flujo de agua en el circuito de distribución y por ende el trabajo de la bomba.

Condiciones de diseño implementadas

Dado los estudios de casos previos para la determinación de la viabilidad económica del tanque y el estudio del estado del arte para el dimensionamiento y consumo de energía, se establecieron las condiciones de diseño para cuantificar el cambio en la eficiencia de los chillers. Teóricamente, los fabricantes coinciden en que por cada grado (°C) de disminución de la temperatura en la condensación, se disminuye el trabajo del compresor entre un 1.8 - 4% (Hanson et al., 2011). En el caso específico de los chillers enfriados por aire, existe aproximadamente una disminución del trabajo del compresor del 2 % por cada grado (°C) a la que se encuentre la temperatura de bulbo seco por debajo de la temperatura de diseño del fabricante (35°C). Del mismo modo, el trabajo del compresor aumenta aproximadamente en un 2% por cada grado (°C) que disminuya la temperatura de salida del agua del evaporador (Carrier, 2005; Peterson, 2017).

Para simplificar, disminuir complejidad, efecto de eficiencias combinadas, optimizar atención poco escalonada y eficiente de la demanda y los costos del dimensionamiento de la planta de enfriamiento, solo se escogen chillers de las mismas especificaciones. Además, la entrada y salida en operación de los chillers depende del comportamiento del perfil de demanda. El algoritmo tiene en cuenta el aumento de la demanda de enfriamiento al ir ingresando a la operación chillers que atiendan los incrementos de carga según la capacidad mínima (20%) y máxima (100%) de modulación de sus unidades compresoras, corrigiendo a su vez las variaciones en las eficiencias (EER) según su porcentaje de carga (Soler et al., 2016; Glazer, 2019). En cuanto al TTES,

sus pérdidas por transferencia de calor dependen de su área superficial, material de construcción y aislamiento, variación de temperatura interna del agua almacenada y condiciones del ambiente exterior, por lo que su cálculo requiere también de simulaciones computacionales, no obstante, típicamente están entre el 1-5% por día según su capacidad de almacenamiento. En este análisis, se toma de la literatura un coeficiente global de transferencia de calor de $0.795 \frac{W}{m^2K}$, típico de estos tanques para calcular las pérdidas por hora (Glazer, 2019). Además, el TTES se ubicaría entre la bomba primaria y secundaria de la planta de enfriamiento, eliminando la necesidad de instalar una bomba dedicada al TTES y pudiendo desprestigiar el efecto adicional de consumo de energía por bombeo (Peterson, 2015).

Para las condiciones de diseño, se contempla un distrito térmico con chillers eléctricos conectados a la red. La temperatura de suministro de agua enfriada de 5°C, con una temperatura de retorno de máximo 12°C proveniente del distrito ubicado a máximo 3 kilómetros de distancia. La planta de enfriamiento se diseña para el mes más crítico de cada ciudad. Se utilizan los datos climáticos de la ASHRAE (Roth, 2017). La figura 2 muestra por ejemplo la variación típica de temperatura durante un día del mes de septiembre de 2021 en la ciudad de Barranquilla, además se incluye el porcentaje de consumo de energía de los compresores, evidenciando la reducción en el consumo eléctrico durante las horas de la noche.

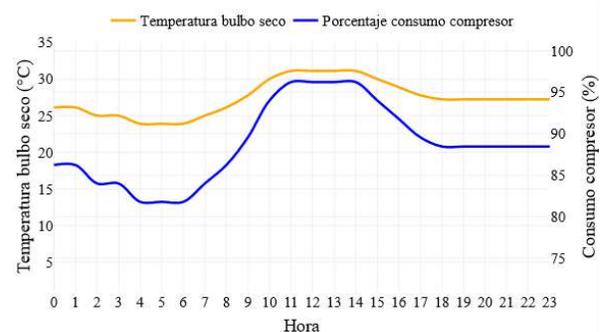


Figura 2. Variación porcentual del consumo del compresor con respecto a la temperatura exterior en Barranquilla.

Fuente: Los autores.

1. ESCENARIOS DE OPERACION

Se estudian tres escenarios de operación para el distrito térmico de enfriamiento:

- **Escenario 1:**

En el primer escenario no se utiliza tanque de almacenamiento, de tal manera que la capacidad total instalada de chillers se defina mediante el pico de demanda a cubrir. La cantidad de chillers operando durante cada hora ($u_{(t)}$) depende de la demanda de enfriamiento en cada hora $Q_{(t)}$ y de la capacidad de la unidad ($C_{c,unidad}$) de acuerdo con la ecuación 1.

$$u_{(t)} = \frac{Q_{(t)}}{C_{c,unidad}} \quad [1]$$

El valor de $u_{(t)}$ es redondeado al número entero siguiente, siendo que una cantidad de chillers igual a $u_{(t)} - 1$ trabajen a carga completa, mientras que la unidad restante trabaje a carga variable.

- **Escenario 2:**

En el segundo escenario se implementa el tanque de almacenamiento, y la capacidad total instalada de chillers ($C_{c,total}$) se define con base en el promedio de la demanda de refrigeración diaria de acuerdo con la ecuación 2.

$$C_{c,total} = \frac{\sum Q_{(t)}}{24} \quad [2]$$

El número de chillers necesarios (u) que operarían las 24 horas del día a carga constante se define por la ecuación 3.

$$u = \frac{C_{c,total}}{C_{c,unidad}} \quad [3]$$

Para cada hora, si la capacidad instalada ($C_{c,total}$) es mayor que la demanda en ese momento ($Q_{(t)}$), el tanque se carga. La capacidad de almacenamiento del tanque (TC) en TRh queda expresada por la ecuación 4.

$$TC = \sum_{t=1}^{24} \{C_{c,total} - Q_{(t)}\} > 0 \quad [4]$$

Por el contrario, cuando la demanda sea mayor que la capacidad instalada, el tanque comienza a

descargarse. En este escenario, los chillers operan las 24 horas del día a carga constante, cargando el tanque en las horas de baja demanda al mismo tiempo que suministran enfriamiento al distrito, y durante las horas pico, los chillers siguen operando a la misma capacidad y el tanque de almacenamiento se empieza a descargar para suministrar el enfriamiento restante y completar la demanda de enfriamiento pico. En esta estrategia de operación se minimiza la capacidad combinada tanto de los chillers como del tanque. Una vez calculada la capacidad del tanque (TC), el volumen de este es calculado con la ecuación 5

$$V_{tanque} = 3600 \frac{TC}{C_p \rho \epsilon \Delta T} \quad [5]$$

Donde TC es la capacidad del tanque en kWh, C_p es el calor específico del agua (4.2 kJ/g), ρ es la densidad del agua (998 kg/m³), ϵ es la eficiencia del tanque, tomada con un valor de 0.9 y ΔT es la diferencia de temperatura del agua de suministro y retorno (7 °C). El valor de 3600 de la fórmula es el factor de conversión de segundos a hora. Las dimensiones del tanque (altura y diámetro) son seleccionadas de tal forma que se minimice la relación área superficial y volumen para minimizar las pérdidas por transferencia de calor. De esto modo, la expresión que minimiza la anterior relación se da cuando la altura es igual al diámetro. Establecidas estas dimensiones, el área superficial (A) es calculada para posteriormente calcular las pérdidas en cada hora con la ecuación 6

$$Q_{perdido} = UA(T_{amb} - T_{interior,prom}) \quad [6]$$

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor ($0.795 \frac{W}{m^2K}$) tomado como referente de la literatura (Glazer, 2019), T_{amb} es la temperatura ambiente del exterior y $T_{interior,prom}$ es la temperatura promedio en el interior del tanque (8.5 °C, promedio entre 5°C y 12°C). Estas pérdidas son consideradas para recalculer la capacidad necesaria de chillers.

- **Escenario 3:**

En el tercer escenario también se implementa el tanque de almacenamiento, no obstante, el esquema de operación de los chillers es diferente. En este escenario hay un conjunto de chillers que operan las 24 horas del día, atendiendo la carga mínima del distrito, y otro conjunto de chillers se utiliza para cargar el tanque de almacenamiento durante las horas de la noche y cubrir la demanda durante las horas pico. El objetivo de este escenario es utilizar una mayor capacidad de chillers para cargar el tanque durante la noche, aprovechando el aumento de eficiencia debido a las bajas temperaturas en el exterior. Dado que los chillers de ambos conjuntos tienen la misma capacidad, este esquema de operación permite ir intercalando el primer y segundo conjunto de chillers a través de los días, prolongando su vida útil y disminuyendo los costos relacionados con su mantenimiento.

Para el análisis económico de cada escenario, se tienen en cuenta los precios mostrados en la tabla 1

Tabla 1. Costos estándar del sector a nivel internacional para distritos de enfriamiento.

Costos de Inversión Distrito Térmico	Valor
Chiller enfriado por aire ($u_{chiller}$)	350 USD /TR
O&M chiller ($u_{O\&M\ chiller}$)	30 USD / TRh /año
O&M TTES ($u_{O\&M\ TTES}$)	100 USD/ m ³ / 20 años
Bomba de distribución (u_{bomba})	20 USD/TR

Fuente: (Carrier, 2005; Darmanto et al., 2018; ASHRAE, 2019)

El precio por tonelada de los chillers enfriados por aire se incrementa significativamente al disminuir su capacidad debido a los costos fijos de manufactura. Para capacidades menores a 150 TR estos precios van desde 400-1000 USD/TR, mientras que para capacidades mayores a 150 TR estos precios van desde 350 a 500 USD/TR (Carrier, 2005). Los costos asociados a las tuberías de polietileno de alta densidad (PAD) para agua fría varían dependiendo del diámetro. Por otra parte, el precio de adquisición de los TTES depende de su capacidad (TRh) y disminuye a medida que esta aumenta (Delta Energy & Environment Ltd, 2016;

Schmidt et al., 2018). Los rangos de costos son muy variables en la literatura, de la guía de la ASHRAE de distritos térmicos de enfriamiento, se obtienen los siguientes rangos, de acuerdo a la capacidad del tanque, mostrados en la tabla 2 (ASHRAE, 2019). Para este análisis se realizó una curva USD/ TRh vs TRh con base en los precios de los tanques mostrados en la anterior guía para determinar el precio por TRh del tanque (u_{TTES}) según el tamaño del distrito.

Tabla 2. Costos estándar del TTES a nivel internacional para distritos de enfriamiento.

Capacidad TTES (TRh)	Rango costo TTES (USD/TRh)
Pequeño (<10,000 TRh)	95-235
Mediano (10,000 TRh – 20,000 TRh)	70-200
Grande (>20,000 TRh)	35 - 100

Fuente: (ASHRAE, 2019)

Para cada escenario se evalúan chillers de diferentes capacidades, y se escoge el resultado que minimice el costo total para una vida útil de 20 años del distrito. El costo total (C_{total}) utilizado para escoger la mejor opción incluye:

Costo de operación ($C_{operación}$) durante 20 años, calculado de multiplicar el consumo de energía de los chillers y de las bombas, el número de horas de operación y la tarifa de electricidad. Las unidades de cada variable se especifican entre corchetes.

$$C_{operación} = Consumo[kW] * horas\ por\ día[h] * tarifa \left[\frac{USD}{kWh} \right] * 365 * 20 \quad [7]$$

- Costo de adquisición de los chillers ($C_{chiller}$), calculado de multiplicar la capacidad instalada de chillers ($C_{c,total}$) y el costo del chiller por TR ($u_{chiller}$).

$$C_{chiller} = C_{c,total}[TR] * u_{chiller} \left[\frac{USD}{TR} \right] \quad [8]$$

- Costos de adquisición de bombas (C_{bombas}), calculado de multiplicar la capacidad

instalada de chillers ($C_{c,total}$) en TR y el costo de la bomba por TR (u_{bomba}).

$$C_{bombas} = C_{c,total}[TR] * u_{bomba} \left[\frac{USD}{TR} \right] \quad [9]$$

- Costos asociados al O&M del chiller ($C_{O\&M,c}$) durante 20 años, calculado de multiplicar la demanda total de enfriamiento por día suministrada por los chillers y el costo de O&M por TRh del chiller ($u_{O\&M\ chiller}$).

$$C_{O\&M,c} = Demanda [TRh] * u_{O\&M\ chiller} \left[\frac{USD}{TRh} \right] * 20 [años] \quad [10]$$

- Costo de adquisición del tanque (C_{tanque}), calculado de multiplicar la capacidad del tanque (TC) y el precio del tanque por TRh (u_{TTES}).

$$C_{tanque} = TC [TRh] * u_{TTES} \left[\frac{USD}{TRh} \right] \quad [11]$$

- Costos asociados al O&M del tanque durante 20 años ($C_{O\&M,t}$), calculado de multiplicar el volumen del tanque (V_{tanque}) y el costo de O&M por m^3 del tanque ($u_{O\&M\ TTES}$).

$$C_{O\&M,t} = V_{tanque} [m^3] * u_{O\&M\ TTES} \left[\frac{USD}{m^3} \right] \quad [12]$$

El costo total (C_{total}) es calculado con la ecuación 13 para el escenario 1 y con la ecuación 14 para el escenario 2 y 3.

$$C_{total} = C_{operacion} + C_{chiller} + C_{O\&M,c} + C_{bomba} \quad [13]$$

$$C_{total} = C_{operacion} + C_{chiller} + C_{O\&M,c} + C_{bomba} + C_{tanque} + C_{O\&M,t} \quad [14]$$

Para efecto de la evaluación de los diferentes escenarios se tiene que el costo asociado a la tubería no es representativo ya que el diferencial de temperatura del agua enfriada se mantiene igual para todos los casos y por consiguiente el flujo en la tubería de distribución, conservando el mismo diámetro. Se considera una tasa de descuento del 8% para los análisis económicos.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La figura 3 ilustra el esquema de operación de cada uno de los tres escenarios propuestos utilizando un distrito de tamaño de 80,000 TR en la ciudad de Barranquilla. Se observa que en el escenario 1 (figura 3a) los chillers se dimensionan para cubrir completamente la demanda pico, en el escenario 2 (figura 3b) los chillers trabajan a una carga constante aproximada de 40,000 TRh, cargando el tanque desde las 11pm hasta las 10am y descargando el tanque en las horas restantes para cubrir el enfriamiento pico del distrito térmico (DT) y en el escenario 3 (figura 3c) un primer conjunto de chillers operan a una carga constante equivalente al 50% de la demanda pico, mientras que un segundo conjunto de chillers carga el tanque desde las 12am hasta las 9am.

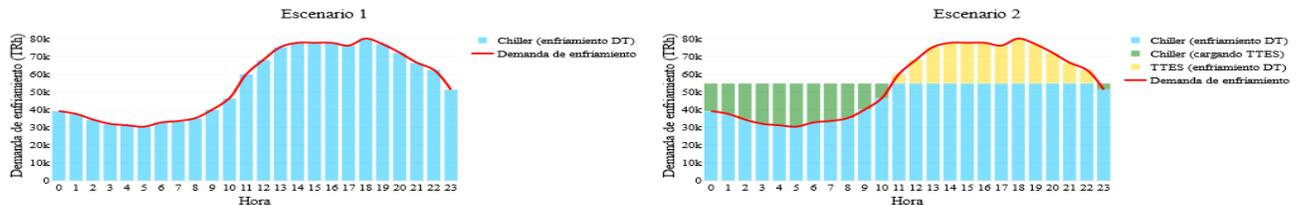


Figura 3. Esquema de operación de los chillers y del tanque en cada escenario para un distrito en Barraquilla con capacidad de 80 000 TR.

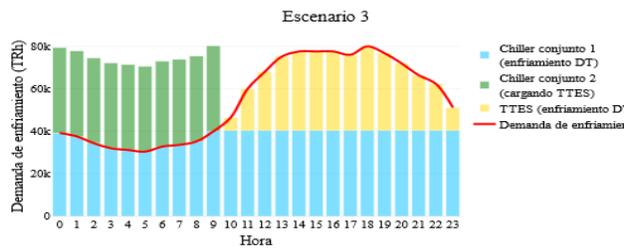


Figura 3. Esquema de operación de los chillers y del tanque en cada escenario para un distrito en Barraquilla con capacidad de 80 000 TR.
Fuente: los autores.

Al implementar el TTES se pudo identificar dos ahorros económicos. El primer ahorro es debido a la reducción en los precios de O&M, debido a que el mantenimiento del tanque es más bajo en comparación al mantenimiento de los chillers. El segundo ahorro es debido a la reducción de la energía eléctrica consumida, debido al uso más eficiente de los chillers en horas de la noche y también debido a que la implementación del TTES permite que los chillers operen a carga constante, independientemente de la demanda de refrigeración, mientras que la *bomba* de distribución (de velocidad variable) se encarga de ajustar la energía de enfriamiento que suministra el TTES al distrito. En cuanto al costo de adquisición, aunque la inversión inicial es mayor con tanques, este costo disminuye a medida que aumenta el tamaño del distrito, llegando incluso a tener ahorros en adquisición para distritos de más de 70000, 80000, 92000 y 120000 TRh pico para las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla

respectivamente. Esta reducción conlleva a payback más bajos para distritos de mayor capacidad, como se puede observar en la figura 4 para ambos escenarios

Los diferentes ahorros alcanzados dependen tanto de la ciudad como del tamaño del distrito, algunos de estos ahorros provenientes de implementar el escenario 2 se pueden observar en la tabla 3 para tres tamaños de distrito diferentes.

De la figura 4 se observa que el escenario 3 obtuvo paybacks más altos en comparación al escenario 2, esto debido a que las curvas de demandas no se ajustan bien a este tipo de escenario puesto que el pico de demanda en el sector residencial se mantiene durante varias horas, requiriendo una mayor capacidad instalada de chillers para cargar el tanque y que este puede soportar el pico posteriormente. Aun cuando se identificó entre un 2% y 3% más ahorro de energía eléctrica con respecto al escenario 2 en ciudades como Bogotá y Medellín, debido a un pico demanda de menor duración, este incremento no compensa el costo adicional de la mayor capacidad de chillers requeridos. Por otro lado, con el escenario 2 se pudo identificar la reducción de la capacidad instalada de chillers alrededor del 58%, 55%, 39% y 30%, para las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla respectivamente. Además, para todas las ciudades las pérdidas por transferencia de calor estuvieron por debajo del 2% de la capacidad del tanque.

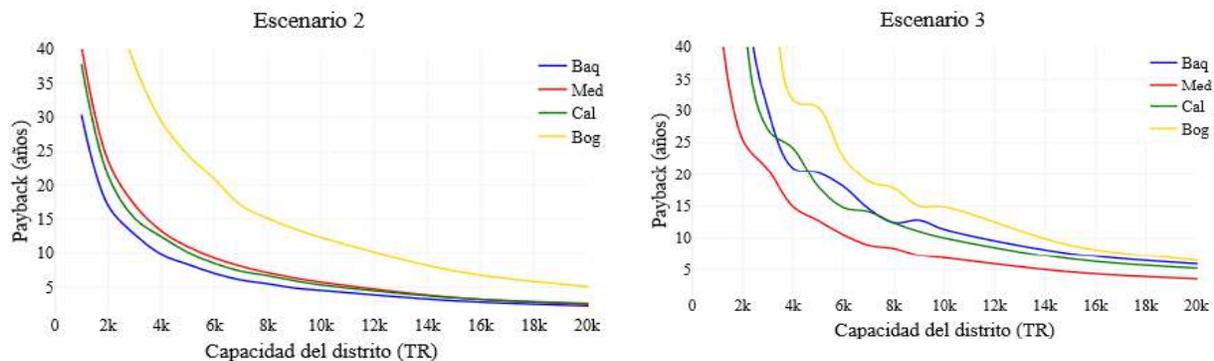


Figura 4. Paybacks para el escenario 2 y escenario 3 en función de la capacidad del distrito.

Fuente: los autores

Ciudad	Tamaño distrito (TR)	Incremento costo adquisición (%)	Reducción costo O&M (%)	Reducción energía kWh (%)
Barranquilla	5000	145.7	6.2	18.1
	10000	82.1	6.5	18.2
	50000	13.4	9.3	18.3
Medellín	5000	136.0	32.4	24.4
	10000	73.2	29.1	24.5
	50000	3.6	32.0	24.6
Cali	5000	140.3	16.3	16.3
	10000	77.2	17.1	16.3
	50000	9.5	19.0	16.4
Bogotá	5000	135.2	32.9	11.5
	10000	70.8	34.4	11.6
	50000	1.4	37.3	11.7

Tabla 3. Porcentajes de ahorros alcanzados para las diferentes ciudades con el escenario 2.

3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó la viabilidad en la implementación del TTES para los escenarios de operación 2 y 3, simulando el comportamiento de los distritos con capacidades que oscilan entre 1000 y 100,000 TR pico en las cuatro principales ciudades de Colombia. Se concluyó que el escenario 2 resultó ser el más rentable. Los ahorros por O&M y energía dependen de los factores climáticos y de la capacidad demandada por el distrito. Se determinó que, para las ciudades de Barranquilla, Medellín y Cali, el TTES puede ser viable, en sectores residenciales, a partir de distrito de 7000 TR pico con paybacks menores a 10 años y a partir de 10,000 TR con paybacks menores a 5 años. Se identificó a Bogotá como la ciudad donde se presenta una menor viabilidad de implementación del TTES para el sector de residencial. Para obtener paybacks menores de 10 años se requieren distritos con capacidades superiores a 13,000 TR. Las estrategias implementadas para el logro de los presentes paybacks y ahorros operacionales (O&M y energía) requiere de la implementación de TES, operando los ciclos de carga durante la noche y descargando la energía almacenada a través de bombas de caudal variable. Cabe anotar que la reducción en los costos de energía se da en manera porcentual ya que están sujetos a la variación de tarifas de energía para cada ciudad y estrato. El TTES conlleva incluso a obtener

ahorros en los costos de adquisición de chillers a partir de distritos con capacidades de 70000, 80000, 92000 y 120000 TR pico para las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla respectivamente.

NOMENCLATURA

SIGLAS

TES	Sistema de almacenamiento de energía térmica (Thermal energy storage)
TTES	Tanque de almacenamiento de energía térmica
O&M	Operaciones y mantenimiento
DT	Distrito térmico
TR	Tonelada de refrigeración
TRh	Tonelada de refrigeración hora

REFERENCIAS

- ASHRAE.,2019. *ASHRAE Handbook- HVAC District Cooling Guide Second Edition*. 2nd ed. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Biyanto, Totok R., Akhmad F. Alhikami, Gunawan Nugroho, Ridho Hantoro, Ridho Bayuaji, Hudiyo Firmanto, Joko Waluyo, and Agus Imam Sonhaji.,2015. "Thermal Energy Storage Optimization in Shopping Center Buildings." *Journal of Engineering and Technological Sciences* 47(5):549–67. doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.7.
- Carrier.,2005. *Commercial HVAC Air-Cooled Chillers*. Nueva york.
- Darmanto, P. S., N. J. Sutanto, I. M. Astina, and A. Marjianto.,2018. "Study of the District Cooling Implementation Opportunity in Jakarta." *AIP Conference Proceedings* 1984(July 2018). doi: 10.1063/1.5046613.
- Delta Energy & Environment Ltd.,2016. "Evidence Gathering:

- Thermal Energy Storage (TES) Technologies." *Department for Business, Energy & Industrial Strategy* 1–85.
- Glazer, Jason.,2019. *ASHRAE Design Guide for Cool Thermal Storage*. 2nd ed. Atlanta.
- Hanson, Susanna, Mick Schwedler, and Beth Bakkum.,2011. "Applications Engineering Manual." *Trane* (November):113.
- Mohamed, Mousa M., and Mohammed Hueesin Almarshadi.,2017. "Simulation of District Cooling Plant and Efficient Energy Air Cooled Condensers (Part I)." *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control* 07(03):45–62. doi: 10.4236/jjectc.2017.73005.
- Peterson, Kent W.,2015. "Chilled Water TES Hydraulics." *ASHRAE Journal* 57(2):40–43.
- Peterson, Kent W.,2017. "Avoiding Stratified Chilled Water TES Problems." *ASHRAE Journal* 59(11):66–69.
- Al Quabeh, Hilal, Roba Saab, and Mohamed I. H. Ali.,2020. "Chilled Water Storage Feasibility with District Cooling Chiller in Tropical Environment." *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 8(1):132–44. doi: 10.13044/j.sdewes.d7.0259.
- Roth, Michael.,2017. "Updating the ASHRAE Climate Design Data for 2017." 80–89. Retrieved (<https://link.gale.com/apps/doc/A509016652/AONE?u=anon~88477f3a&sid=googleScholar&xid=e9becd1b>).
- Schmidt, Thomas, Thomas Pauschinger, Per Alex Sørensen, Aart Sniijders, Reda Djebbar, Raymond Boulter, and Jeff Thornton.,2018. "Design Aspects for Large-Scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling." *Energy Procedia* 149:585–94. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.223.
- Soler, Mònica Subirats, Carles Civit Sabaté, Víctor Benito Santiago, and Faryar Jabbari.,2016. "Optimizing Performance of a Bank of Chillers with Thermal Energy Storage." *Applied Energy* 172:275–85. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.099.
- Zhang, Zhiqin, William D. Turner, Chen Qiang, Chen Xu, and Song Deng.,2010. "A Method to Determine the Optimal Tank Size for a Chilled Water Storage System under a Time-of-Use Electricity Rate Structure." *ICEBO - International Conference for Enhanced Building Operations* 11.

Propuesta de un distrito térmico como centro para el desarrollo sostenible del norte de Buga

José Daniel Ballén Briceño^{1*}; Adriana López Vargas²

¹*jballenbric@uniminuto.edu.co*; ²*Adriana.lopez@uan.edu.co*

RESUMEN

El presente trabajo realiza la propuesta conceptual de un distrito térmico en el norte de la ciudad de Buga con enfoque primario en suplir la demanda de enfriamiento requerida por el ESE Hospital Divino Niño (<https://www.hdn.gov.co/>) y un proyecto de vivienda. En primer lugar, se realizó un diseño conceptual del distrito térmico con el uso de fuentes de energías renovables (Campbell & Olgay, 2018), la revisión in situ de los equipos de climatización del hospital y el cálculo de carga térmica del proyecto de vivienda existente: Uninorte. Este proyecto identifica a la ciudad de Guadalajara de Buga, y en general a las ciudades intermedias (Torres y Caicedo, 2015), como un actor relevante para la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Finalmente, se realizó un análisis económico preliminar del proyecto, así como una propuesta inicial del modelo de negocio.

ABSTRACT

This paper proposes an energy district in the north of Buga with a primary focus on supply the thermal energy (cold) of a public hospital and a housing project. First, a conceptual design of the energy district was carried out with the use of renewable energy sources (Campbell & Olgay, 2018), as well as the energy demand of the hospital, its expansion and the surrounding housing projects. This project identifies the city of Buga, and in general the intermediate cities (Torres & Caicedo, 2015), as a relevant actor for the achievement of the Sustainable Development Goals. Finally, an initial economic analysis of the project was carried out, as well as its possible impacts according to local and national public policies.

Palabras Clave

Distritos térmicos, energía térmica solar, chiller de absorción, ciudades intermedias, ODS.

¹ Corporación Universitaria Minuto de Dios, Docente Investigador; Buga, Colombia; jballenbric@uniminuto.edu.co

² Universidad Antonio Nariño, Coordinadora del programa de Ingeniería Electromecánica – Sede Buga, Palmira, Colombia; Adriana.lopez@uan.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los distritos térmicos son fundamentales para el cumplimiento del objetivo de desarrollo sostenible número once: ciudades y comunidades sostenibles, ya que aportan en la formación de ciudades inclusivas y resilientes. Las ciudades intermedias son estructuras urbanas de menor tamaño, menor población y con la posibilidad de establecer una planificación para su desarrollo sostenible en un lapso menor a un aumento significativo de su población (Barragán-Escandón et al, 2020). Las ciudades intermedias también aportan en la consecución del objetivo de desarrollo sostenible número siete: energía asequible y no contaminante, ya que cuentan con demandas energéticas que pueden ser suplidas con energías renovables, sus cargas son muy inferiores comparadas con las de las ciudades capitales, así como la posibilidad de realizar pilotos que si puedan beneficiar a una parte significativa de la población y finalmente, expandir el proyecto a través de módulos que garanticen el acceso a energía sin dejar a un lado, los resultados económicos favorables para los inversores del proyecto.

El 58,84% de la población mundial urbana, reside en ciudades con una población inferior al millón de personas. Los criterios para la definición de una ciudad intermedia son dinámicos e incluyen parámetros como: tamaño de la población, competencias administrativas, tamaño del presupuesto, conectividad externa y conectividad interna, entre otros. (CGLU, 2015). Por lo tanto, aunque los principales distritos térmicos en Colombia se encuentran en ciudades capitales como Medellín, Montería y Cartagena, en este documento se propone la creación de un distrito térmico, aprovechando las ventajas que ofrecen las ciudades térmicas como demandas menores a las de las ciudades capitales y las posibilidades de escalabilidad de los proyectos.

El objetivo de este trabajo es la propuesta conceptual de un distrito térmico para la ciudad

intermedia de Guadalajara de Buga en el Valle del Cauca, con el uso de energía renovable: un sistema solar térmico y el uso de un chiller de recuperación de calor (absorción), para suplir la demanda de frío y climatización de un hospital público y un proyecto de vivienda de interés social.

Para el desarrollo del proyecto se propone un modelo de negocio público privado, y la propuesta de operar el sistema a través de dos ESCo (Compañías de servicios energéticos, por su sigla en inglés), una compañía propietaria de la generación y la otra compañía propietaria de la red de distribución (Suhonen & Okkonen, 2013), así como la consideración de una vida útil de 30 años en la red de distribución, que implica una configuración financiera con retorno en el largo plazo.

1. LAS CIUDADES INTERMEDIAS

Las ciudades intermedias se pueden definir por el tamaño de su población, menor a un millón de personas para el caso de Latinoamérica (Torres y Caicedo, 2015), las competencias administrativas y la capacidad presupuestal, que en el caso de Colombia los municipios y departamentos pueden presentar proyectos para ser financiados por las regalías de orden nacional. Así mismo, para el éxito de las ciudades intermedias se espera que hagan parte de redes de ciudades nacionales como la federación colombiana de municipios o redes internacionales como UCGL – United cities and Local Governments (<https://www.uclg.org/es>).

Para el objetivo del presente trabajo profundiza dos de las ventajas de las ciudades intermedias: menores cargas térmicas que en las ciudades capitales y la posibilidad de realizar pilotos que benefician a una parte significativa de la ciudad y, por lo tanto, puedan entregar resultados relevantes y con posibilidad de ser escalables a lo largo del tiempo.

2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL DISTRITO TÉRMICO

2.1. Cálculo de demanda térmica

Para realizar el diseño conceptual del distrito térmico, es necesario conocer la demanda térmica del sector analizado, esto es, del ESE Hospital Divino Niño y los edificios residenciales de Uninorte de la ciudad de Buga. En el caso del hospital, la información fue suministrada por la misma entidad, donde según el inventario de sistemas de climatización con los que actualmente cuentan, están consumiendo 693000 BTU/h.

Para la carga térmica requerida por los edificios de Uninorte, se realizaron los cálculos de carga térmica según el modelo ASHRAE CLTD/CLF (Spitler, McQuiston & Lindsey, 1993), el cual tiene en cuenta las cargas solares, a través de barreras, por luces, por personas, por electrodomésticos y equipos eléctricos. Esta urbanización cuenta con 32 edificios, cada uno con cinco pisos y cada piso cuenta con cuatro apartamentos. Cada apartamento cuenta con un área de 26 m².

Estos edificios tienen una de sus fachadas al occidente y otra al oriente, por lo que recibe una el sol de la mañana y el sol de la tarde, como se puede apreciar según la Figura 2.



Figura 1. Vista parcial Uninorte.
Fuente: CNC Buga

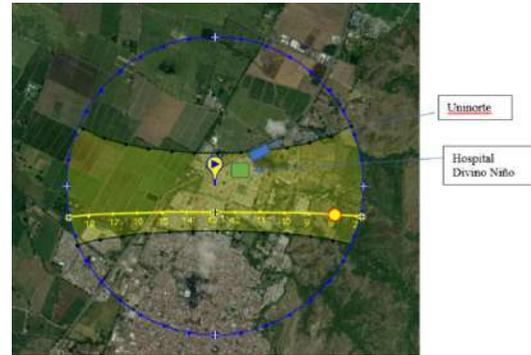


Figura 2. Movimiento del sol sobre Buga / Uninorte
Fuente: SunEarthTools, 2021.

La carga solar se recibe a través de superficies traslúcidas como las ventanas. Cada piso cuenta con ocho ventanas hacia cara occidente y otras ocho a cara oriente. Cada ventana tiene 1 m² de área, teniendo en cuenta los parámetros del material, se calcula la carga con las ecuaciones 1, 2 y 3 (Alfonso G, 2018).

$$\dot{Q}_1 = \sum_{j=1}^N (Q_j^{\text{Directa}} + Q_j^{\text{Difusa}}) \quad [1]$$

$$\dot{Q}_{1j}^{\text{Directa}} = (A_{\text{sol}} * SHGF * SC * CLF) \quad [2]$$

$$\dot{Q}_{1j}^{\text{Difusa}} = (A_{\text{som}} * SHGF * SC * CLF_N) \quad [3]$$

Por tanto, la carga solar a través de las ventanas es de 1842,9 BTU/h (540,1W).

La carga a través de barreras como paredes, piso y techo, es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_2 = \sum \dot{Q}_{2 \text{ Ext}} + \sum \dot{Q}_{2 \text{ Int}} \quad [4]$$

Donde se tiene en cuenta la carga por barreras exteriores (ext) e interiores (int). Las barreras exteriores se toman como los techos de los 32 edificios y las paredes, como las fachadas externas. Se tiene en cuenta los factores de corrección, los tipos de paredes y pintura, área expuesta a la radiación (paredes de fachada y techos) las paredes que no están sometidas a radiación directa, temperaturas máximas exteriores, cálculo de resistencias térmicas, cálculo de coeficiente global

de transferencia de calor. Finalmente, la carga por barreras es de 86.933,2 BUT/h (25.477,96W).

Con respecto a la carga por luces, se tienen que los apartamentos tienen bombillos ahorradores (lámparas compactas fluorescentes o LFC por sus siglas en inglés). Cada uno de ellos cuenta con siete bombillas en sus diferentes espacios. La carga por iluminación está dada por:

$$\dot{Q}_{3f} = \sum(W_f * 1,2 * F_u * CLF_{Luces}) \quad [5]$$

Finalmente, se obtiene una carga por iluminación de 10.809,7 BTU/h (3168 W).

Con respeto a la carga por personas, ésta se determina de acuerdo a las actividades que harán las personas en el recinto climatizado, como también la cantidad de personas que se encontrarán en el mismo. Para calcular la carga por personas se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{4s} = \sum_{i=1}^n (NP * \dot{Q}_p * PS * CLF_{Personas})_i \quad [6]$$

Teniendo en cuenta la cantidad de personas promedio por apartamento (cuatro personas), la carga que producen por las actividades que realizan en su vivienda, por los factores de corrección correspondientes, la carga por personas da un total de 386.8741,8 BTU/h (1'133.816,3 W).

Para la carga por electrodomésticos, se tendrá en cuenta que cada apartamento tiene equipos como nevera y estufa, televisor y ventilador. Se siguen las ecuaciones para calcular este tipo de carga.

$$\dot{Q}_6 = (\dot{Q}_{6s} + \dot{Q}_{6L}) \quad [6]$$

$$\dot{Q}_{6s} = \sum_{k=1}^m (\dot{Q}_{SE} * NE * Fu * CLF)_k \quad [7]$$

$$\dot{Q}_{6L} = \sum_{k=1}^m (\dot{Q}_{LE} * NE * Fu)_k \quad [8]$$

Por lo tanto, asumiendo las cargas térmicas disipadas de los electrodomésticos anteriores, la carga por electrodomésticos es de 1357568,3 BTU/h (397.824 W). La carga por infiltraciones de aire (hendidias, puertas, ventanas, etc.) se tomará como el 2% del valor total de la carga (Orozco H, 2001). Sumando entonces, la carga térmica total para abastecer los 640 apartamentos es de 1'913.619 Btu/h que equivalen a unos 560,83 kW. El hospital Divino Niño tiene actualmente instalados en equipos de climatización una carga de 693.000 Btu/h. Por lo tanto, la carga térmica total a satisfacer es de 2'606.619 BTU/h.

1.1. Diseño Conceptual del distrito térmico

Se propone para este distrito, un chiller por absorción usando agua caliente proveniente de colectores solares de placa plana, que generan directamente agua caliente. La carga total a satisfacer es de 2'606.619 BTU/h., que en toneladas de refrigeración es de 217,2 TR. Por lo tanto, se propone un chiller de absorción con capacidad de 240 TR nominales.

Para satisfacer la demanda de agua caliente para cada chiller, se propone utilizar colectores solares, con el fin de incluir fuentes de energías renovables en el arreglo. Un colector solar con capacidad de calentar 250 litros de agua (y tanque de almacenamiento). Teniendo en cuenta la cantidad de agua requerida y el área total por los 120 colectores de placa plana requerida, son necesarios los techos de seis de los edificios de Uninorte. Las ventajas de contar con estos colectores solares en los edificios de vivienda, es la gran área disponible para la instalación, la cual es limitada en el hospital. Otra ventaja es que reduce la carga térmica de los edificios porque la radiación es absorbida por el agua de los paneles térmicos.

El colector solar seleccionado ocupa un área total de 3,8m² (incluyendo el área proyectada del tanque de almacenamiento). Cada techo de los edificios tiene un área de 106m², siendo en total 16 edificios. El

área total requerida para los colectores (teórica) es de 457,16m² lo cual da teóricamente una cantidad de “4,3 techos” es decir, se ocupan cinco áreas de techo de las 16 disponibles.

Los otros elementos del conjunto, son los sugeridos por el fabricante de este tipo de chiller, el cual requiere un flujo de agua caliente de 775 galones por minuto y una potencia eléctrica de 3,82 kVa.

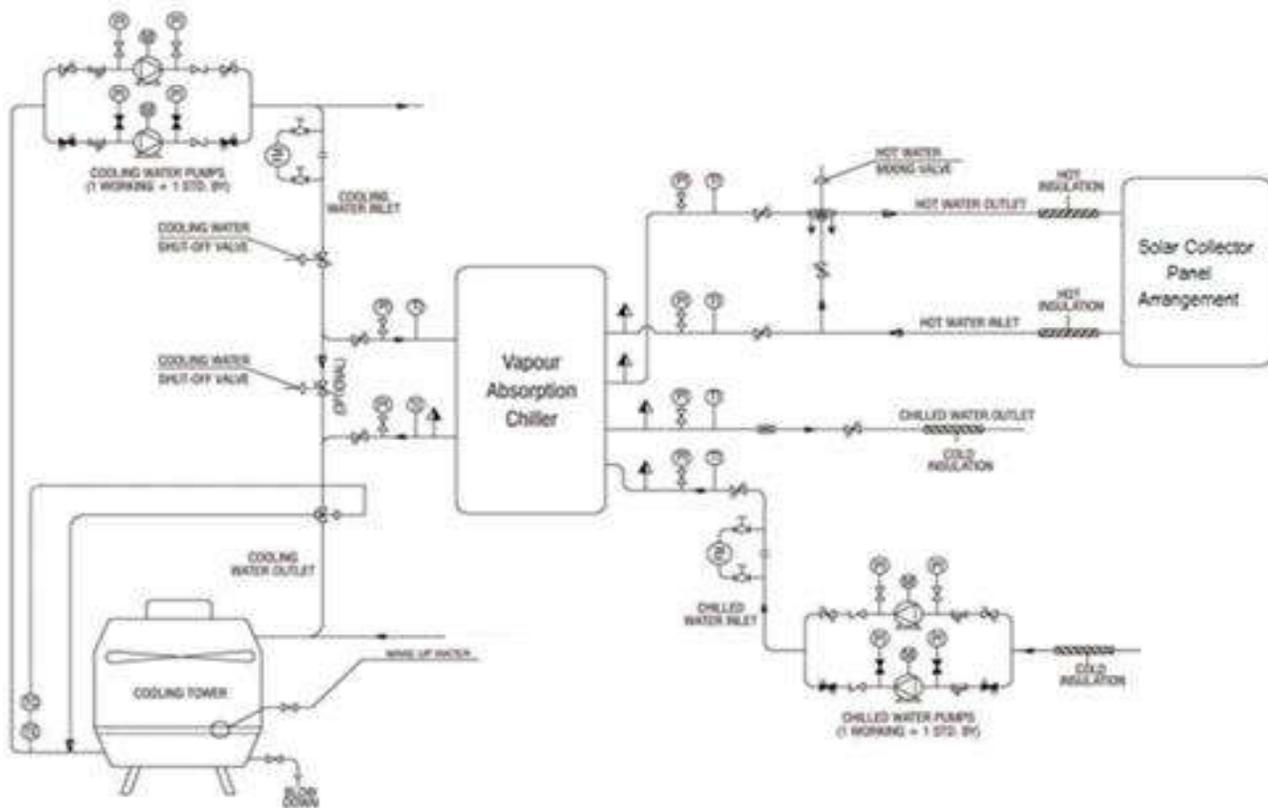


Figura 3. Esquema general chiller de absorción

Fuente: <https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/lar/es/product-systems/comercial/Enfriadoras-de-liquido/por-absorcion>

2. ANÁLISIS PRELIMINAR DE COSTOS DEL DISTRITO TÉRMICO

De acuerdo con la guía metodológica de distritos térmicos del 2019, y los referentes presupuestales de diferentes proveedores, unas estimaciones iniciales de los costos de este distrito térmico son:

Como todo distrito térmico es un proyecto de alto costo inicial y con posibilidades de retorno en el largo plazo, sin embargo, existen diferencias en la vida útil y costo en el sistema de generación: 15 años y distribución: 30 años, que hacen posible hacer una

diferenciación entre dos compañías de servicios energéticos que las puedan administrar en el largo plazo con la garantía del apoyo gubernamental local en el largo plazo y con un acuerdo macro que supere el cuatrienio del gobierno local de turno

Tabla 1. Costos de inversión

Ítem	Número de referencia	Costo Total
Central de enfriamiento	240 TR	5'300.000 USD
Sistema de distribución	1400 metros	2'800.000 USD
Sistema de conexión	240 TR	360.000 USD

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2. Costos operacionales

Ítem	Número de referencia	Costo Operación y mantenimiento - por año
Sistema de generación	3% CAPEX	84.900 USD
Sistema de distribución	1,5% CAPEX	42.000 USD

Fuente: Elaboración Propia

3. PROPUESTA INICIAL DEL MODELO DE NEGOCIO

Aprovechando las ventajas de las ciudades intermedias se propone un modelo de negocio mixto: donde el gobierno local, respaldado por su red de conectividad nacional y global, garanticen la facturación en el largo plazo, así como un subsidio mínimo para los usuarios finales en las primeras fases del proyecto. Una posibilidad con gran potencial es la utilización de los recursos públicos provenientes del sistema de regalías y el cumplimiento de la política pública de ciencia, tecnología e innovación del Valle del Cauca.

La baja demanda inicial, puede ser aprovechada por un piloto, por ejemplo, para un solo edificio de Uninorte e ir escalando el proyecto de acuerdo a sus resultados económicos.

Finalmente, se propone la implementación de dos ESCo privadas, uno para la generación y otro para la red de distribución, aprovechando las diferencias de vidas útiles, y su diferencia de costos. Esta propuesta de negocio mixta busca en primer lugar: romper el paradigma de proyectos de corto plazo, así como utilizar lo mejor de la empresa pública y privada, bajo un esquema de meritocracia y resultados económicos que finalmente resulten en el desarrollo sostenible de la región.

4. CONCLUSIONES

La propuesta conceptual es por un distrito térmico con la energía térmica captada por colectores solares, y un chiller de absorción que supla la necesidad energética de un proyecto de vivienda y

un hospital público cercano (separados por solo 1.400 metros). Además de la respuesta de suplir energía asequible y segura, se hace posible aprovechar la ubicación del proyecto para que, en su construcción, puesta en marcha y operación mejore la empleabilidad formal de los habitantes del sector.

La posibilidad técnica de este proyecto debe estar acompañada por políticas de largo plazo, que trasciendan los cuatrienios de los gobiernos locales y que respalden a la empresa privada para operaciones y recuperación de la inversión. Así como las garantías legales para la creación de alianzas público – privadas para diseñar, construir y operar soluciones energéticas en el largo plazo.

La implementación de distritos térmicos en Colombia puede ser potencializada por las ventajas de las ciudades intermedias como menores cargas, lo cual los hace susceptibles a la implementación de proyectos por módulos o pilotos que beneficien a una parte significativa de la población.

Como oportunidades de investigación están: la utilización de energía renovable para suplir la demanda energética de los equipos rotativos del distrito térmico, un estudio detallado de la carga térmica del hospital y el impacto de su futura ampliación. El impacto de la calidad y climatización del aire interior en la productividad y bienestar de los habitantes de viviendas de interés social. Así como el perfeccionamiento de un modelo de negocio mixto y rentable para todos los grupos de interés.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al ingeniero Carlos Hernando Cárdenas Ruiz, Coordinador de recursos fijos y al doctor Hernán Villaquiran Terán, Gerente del ESE Hospital Divino Niño en Guadalajara de Buga, por su apertura a la presente propuesta académica y la disposición para atender las visitas realizadas a las instalaciones del hospital. Los autores tienen en

común el interés por el desarrollo sostenible de la región y la transformación social del norte de Buga.

REFERENCIAS

- Alfonso-Garzón, Carlos A (2018). Análisis De Diferentes Clases De Vidrio, Para La Elaboración De Una Ayuda Gráfica Como Soporte Técnico, Que Considere Sus Características Térmicas, Físicas Y Ópticas. Universidad Católica de Colombia, Disertación de Maestría en Diseño Sostenible.
- Barragan-Escandon, A., Zalamea-León, J., Terrados-Cepeda, J., y Vanegas-Peralta, P. (2020), Energy self-supply estimation in intermediate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 129 (1). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109913>
- Campbell, I, Olgay, V (2018) An Integrative Business Model for Net-Zero Energy Districts. *Urban Energy Transition (Second Edition) Renewable Strategies for Cities and Regions*, Pages 445-456. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102074-6.00035-8>
- El País. Foto de Archivo, Uninorte. Recuperado de: <https://www.elpais.com.co/valle/presidente-ivan-duque-anuncio-recursos-para-el-municipio-de-buga.html>
- Districtos térmicos: Guía metodológica / Unidad Técnica de Ozono, Ed.: Mariaca Orozco, Hilda Cristina. Bogotá, D. C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019.
- Orozco H, C. A. (2001) Método para calcular cargas térmicas. Pereira: Diplomado Proyectos de aire acondicionado UTP-ACAIRE.
- Rodríguez Sofan, Manuel Guillermo; Díaz Restrepo, Carlos Alberto (2011). Determinación De Las Cargas Térmicas Para Garantizar El Confort En El Auditorio De La Universidad Tecnológica De Bolívar. Universidad Tecnológica de Bolívar, Monografía de Ingeniería Mecánica, 2011.
- Torres P., Caicedo P. (2015). Las ciudades intermedias con mayor potencial en Colombia: un sistema de identificación. Nota técnica del Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Las-ciudades-intermedias-con-mayor-potencial-en-Colombia-Un-sistema-de-identificaci%C3%B3n.pdf>
- Trane (2021): <https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/lar/es/product-systems/comercial/Enfriadoras-de-liquido/por-absorcion/>
- Spitler, J.D., F.C. McQuiston, K. Lindsey. (1993). The CLTD/SCL/CLF Cooling Load Calculation Method, ASHRAE Transactions. 99(1): 183-192
- Suhonen, N. & Okkonen, L. (2013) *The Energy Services Company (ESCo) as business model for heat entrepreneurship*,. *Energy Policy* 61(1). P 783-787. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.047>
- SunEarthTools, 2021. Búsqueda Guadalajara de Buga. Recuperado de: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es
- UCGL (2015) Documento marco para la planificación y gestión del desarrollo urbano sostenible de las ciudades intermedias. Recuperado de: https://www.ucgl.org/sites/default/files/cglu_documento_marco_ci_0.pdf

Análisis termodinámico y comparación de un CRS convencional y un CRS con tanque flash en el LTC operado con pares de refrigerantes de bajo GWP

Jesús Jiménez¹; Gustavo Guzmán^{2*}

¹jjimenezaguilar@coruniamericana.edu.co; ²gustavo.guzman56@uac.edu.co

RESUMEN

La necesidad de mitigar el impacto ambiental ha dado lugar a investigaciones sobre la aplicación de refrigerantes naturales de bajo GWP y su efecto sobre el rendimiento termodinámico en sistemas de refrigeración, especialmente en sistemas centralizados de alta densidad energética como los distritos térmicos. Debido al bajo GWP y buenas propiedades termodinámicas, se ha incrementado el uso del CO₂ (R744) en sistemas de refrigeración operados en entornos con temperaturas ambientales bajas y moderadas, limitando su operación en climas tropicales debido a su baja temperatura crítica (31°C) con relación a otros refrigerantes. Como solución, ciclos de refrigeración transcíticos y en cascada (CRS) se han propuesto. En los CRS la configuración y la selección adecuada de combinación de pares refrigerantes juega un papel importante sobre el rendimiento termodinámico, así como también, sus parámetros de operación. En la presente investigación se realizó una evaluación termodinámica y comparación entre un CRS convencional y un CRS con tanque flash en el en el circuito de baja temperatura (LTC), combinando pares de refrigerantes R717, R161, R600A, R1234yf, R1233ze, R1234ze(E) y R1234ze(Z) con R744. Los resultados mostraron que el ciclo convencional presenta una temperatura de condensación (T_{MC}) en la cual el ciclo alcanza el máximo rendimiento. Para una T_{MC} óptima, incrementar 5°C la temperatura de evaporación (T_{evap}), supone una mejora en el COP del 11.8%. El uso del tanque flash en el LTC mejora significativamente el COP del ciclo en comparación a un CRS convencional, especialmente a bajas T_{evap} , los resultados mostraron una mejora de hasta un 50,4% sobre el COP .

ABSTRACT

The need to mitigate environmental impact has led to research on the application of natural refrigerants with low GWP and their effect on thermodynamic performance in refrigeration systems, especially in centralized systems of high energy density such as thermal districts. Due to the low GWP and good thermodynamic properties, the use of CO₂ (R744) has increased in refrigeration systems operated in

¹ Corporación Universitaria Americana, Docente de Planta; Barranquilla, Colombia; 3008385918, jjimenezaguilar@coruniamericana.edu.co

² Universidad Autónoma del Caribe, Docente de Planta; Barranquilla, Colombia; 3017904218, gustavo.guzman56@uac.edu.co

environments with low and moderate environments temperatures, limiting its operation in tropical climates due to its low critical temperature (31°C) relative to other refrigerants. As a solution, cascade (CRS) and transcritical refrigeration cycles have been proposed. In the CRS the configuration and the selection of combination of refrigerant plays an important role on the thermodynamic performance, as well as its operational parameters. In the present research a thermodynamic evaluation and comparison of a conventional CRS and CRS with flash tank in the low temperature circuit (LTC) was carried out combining a set of refrigerants R717, R161, R600A, R1234yf, R1233ze, R1234ze(E) and R1234ze(Z) with R744. The results of the thermodynamic evaluation showed that the cycle presents a condensation temperature (T_{MC}) in which the maximum performance is reached. For an optimal T_{MC} , increasing the evaporating temperature (T_{evap}), by 5°C represents an improvement in the COP of 11.8%. The use of flash tank in the LTC significantly improve the COP compared to a conventional CRS, especially at low T_{evap} , the results showed an improvement of up to 50,4% over the COP.

Palabras Clave

Refrigeración en cascada, R744, tanque flash, análisis termodinámico, eficiencia exergética.

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de países, las edificaciones consumen alrededor del 40% de su energía primaria y cerca del 50% de este consumo está asociado a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) (Qiu et al., 2020). Los sistemas HVAC en edificaciones emiten el 33% de las emisiones globales de gases efecto invernadero y se prevé que el consumo de energía en edificaciones aumente (Kharseh et al., 2014), especialmente por aire acondicionado y ventilación debido a la creciente demanda de confort térmico por el incremento de la temperatura ambiente exterior que tiene una influencia directa sobre la carga térmica (Kharseh et al., 2014; Papakostas & Slini, 2017). La creciente adopción de sistemas de aire acondicionado podría significar cientos de millones de toneladas de aumento de las emisiones de dióxido de carbono, además, los refrigerantes utilizados en estos sistemas son en sí mismos un potente gas de efecto invernadero (Biardeau et al., 2019), por lo tanto, es importante reducir el consumo de energía y sus consecuencias sobre el medio ambiente.

Los distritos térmicos para la refrigeración constan de un sistema centralizado de suministro de refrigeración, por lo general mediante un sistema de refrigeración por compresión de vapor (VCRS) y

una red de distribución de tuberías aisladas bidireccionales que conectan las fuentes de energía a la demanda de varios clientes (Balboa-Fernández et al., 2020), son una tecnología emergente que se proyectan como una alternativa eficiente para satisfacer la demanda de aire acondicionado, pueden ahorrar hasta un 50% de la demanda de energía primaria en comparación con tecnologías convencionales (centralizados y descentralizados), ahorrar hasta un 44% en costos operacionales y reducir las emisiones de CO₂ en un 40% (Alajmi & Zedan, 2020; Dincer & Abu-Rayash, 2020; Hampo et al., 2021; Thakar et al., 2021). Algunas de las principales áreas de investigación encontradas en la literatura para hacerle frente a la reducción del consumo de energía y al impacto ambiental relacionado con los sistemas de refrigeración, consisten en el desarrollo de ciclos más eficientes, métodos de control, optimización de las condiciones de operación y la evaluación del uso de fluidos refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP) como sustitutos potenciales a los refrigerantes hidrofluorocarbonos (HFCs) utilizados en la actualidad.

Los HFCs son los refrigerantes comúnmente más usados en países desarrollados, se encuentran en aplicaciones de refrigeración doméstica, móviles y chillers de mediana y gran capacidad (Longo et al., 2015), por su GWP relativamente alto, los

refrigerantes hidrofluoroolefinas (HFOs) y refrigerantes naturales como amoníaco y dióxido de carbono (R744) se han propuesto como candidatos para el reemplazo de los HFCs, principalmente por su bajo GWP (Domanski et al., 2017; Emani & Mandal, 2018; Heredia-Aricapa et al., 2020; Longo et al., 2015). Los refrigerantes HFOs son un subconjunto de HFCs pero con características ambientales muy diferentes de los HFCs, muchos de ellos presentan valores de GWP menor que 1 (McLinden et al., 2020), dentro del grupo de refrigerantes HFOs se destacan los refrigerantes R1234yf, R1234ze, R454B, R452B, R290, R600, y R600a por su bajo GWP y su buen rendimiento termodinámico (Ben Jemaa et al., 2017; Emani & Mandal, 2018; Mohsin Tanveer & Bradshaw, 2021).

Gracias a las ventajosas propiedades termodinámicas, la no toxicidad, no inflamabilidad, bajo costo y disponibilidad en el mercado, el R744 se perfila como el mejor de los sustitutos en aplicaciones de refrigeración, se ha adoptado cada vez más en la refrigeración comercial y su desarrollo en otros subsectores de HVAC y refrigeración, como los sistemas de refrigeración comercial ligera y la refrigeración industrial ha ido en avance (Bruno et al., 2019; Zolcer Skačanová & Battesti, 2019), sin embargo, la baja temperatura crítica del R744 (31°C) hace que su aplicabilidad en sistemas de refrigeración convencional (subcrítica) sea limitada. En climas cálidos donde la temperatura ambiental es mayor que la temperatura crítica del R744, el condensador no podrá transferir calor, y a temperaturas cercanas a la temperatura crítica pero inferiores a ella, la reducción drástica en la entalpía de vaporización del R744 genera una reducción en el rendimiento del sistema (Maina & Huan, 2015). Como solución, se han propuesto ciclos de refrigeración transcíticos y ciclos de refrigeración en cascada (CRS), los ciclos de refrigeración transcíticos vencen tal limitación mediante la operación del gas en estado supercrítico, sin embargo, traen consigo dos desafíos, las altas presiones de operación y la degradación de la capacidad de rechazo de calor que reduce el coeficiente de rendimiento (COP)

(Bruno et al., 2019; Maina & Huan, 2015), para minimizar el impacto de la operación transcítica varios métodos han sido propuestos, los más predominantes son la modificación del ciclo de refrigeración mediante compresión paralela, el uso de un expansor mecánico y/o eyector (Belusko et al., 2019). Por otro lado, los CRS es una configuración ampliamente utilizada en la refrigeración comercial (Bellos & Tzivanidis, 2019), consiste en el acoplamiento térmico de dos ciclos monoetapa trabajando con diferentes refrigerantes, donde el circuito de alta temperatura (HTC) mantiene el circuito de baja temperatura (LTC) del R744 siempre en condiciones subcríticas, evitando así las altas presiones de funcionamiento del R744 y la necesidad de regulación de la alta presión en condiciones transcíticas (Bellos & Tzivanidis, 2019; Nebot-Andrés et al., 2017).

Los CRS han sido estudiados por diversos autores, (Jemni et al., 2015) desarrolló un análisis comparativo mediante simulación de un sistema de refrigeración por compresión de vapor de una etapa (SS-VCRS) y CRS utilizando como fluido de trabajo R744, HFCs y mezclas de refrigerante con (R290, R1270 y R170 en LTC y R290, R1270 y R600a para HTC), encontró que para un SS-VCRS, el COP máximo se obtiene utilizando refrigerantes puros (R22, R290 y R1270) y es mayor al de un SS-VCRS operado con R744. Aumentar la concentración de R744 en la mezcla de refrigerante, reduce el COP del sistema; en el ciclo CRS se presenta un comportamiento similar, cuando se varía la concentración de R744 en la mezcla del LTC manteniendo refrigerante puro en el HTC hasta una concentración de 0.5, a partir de ahí, el rendimiento aumenta. Finalmente concluyeron que es posible reemplazar con R744 el 70% de refrigerantes nocivos sin afectar el rendimiento utilizando CRS. (Mosaffa et al., 2016) llevó a cabo un análisis exergo-económico y ambiental de CRS operado con R744/NH₃ y utilizando (a) dos tanques flash y (b) dos tanques flash y un interenfriador indirecto en el LTC; El sistema (a) presentó un mejor rendimiento que el sistema (b) para diferentes temperaturas de evaporación (-45°C a -35°C). Al incrementar 10 K la

temperatura de evaporación mejoraron en un 16.9% y 20.8% el rendimiento del sistema (a) y (b) respectivamente. En cuanto al impacto de la variación de la temperatura de condensación para el LTC y HTC sobre el COP de ambos sistemas, la variación de temperatura de condensación en el HTC tuvo una influencia más significativa que la variación de la temperatura de condensación del LTC. El COP del sistema (a) mostró menor degradación al aumentar la temperatura de condensación del LTC que el sistema (b).

(Amaris et al., 2019), encontraron que para capacidades de refrigeración de 125 kW en media temperatura (MT) y 25 kW en baja temperatura (LT), un CRS opera con un mejor COP que un ciclo convencional con *booster* y compresión paralela y *booster* operado con R744 a temperaturas ambientes oscilantes entre 20°C hasta 40°C, y para una capacidad de refrigeración de 25 kW en MT y 5 kW en LT, solo fue ligeramente mejor a temperaturas ambientales oscilantes entre 28°C hasta 40°C. (Massuchetto et al., 2019), evaluó el rendimiento del CRS utilizando como fluido de trabajo para el LTC y HTC mezcla de refrigerantes naturales (R1270, R717 y RE170) con R744. El efecto de la concentración del R744 en la mezcla de refrigerante tuvo un impacto significativo en el aumento de la eficiencia del ciclo, el COP se incrementó de 18% al 32%, respecto a un ciclo de CRS utilizando refrigerantes puros.

(Sun, Wang, Xie, et al., 2019), utilizaron R23, R41 y R170 en el LTC y R32, R1234yf, R1234ze, R161, R1270, R290 y R717 en el HTC para un CRS, encontraron que existe una temperatura de condensación en el LTC que maximiza el COP del sistema para los diferentes pares de refrigerantes utilizados. A temperaturas de evaporación entre -80°C y -30°C y con temperaturas de condensación óptimas en el LTC el máximo COP fue alcanzado utilizando los refrigerantes R1234ze y R1234yf en el HTC. E. (Bellos & Tzivanidis, 2019), evaluaron la operación de CRS operados con 17 refrigerantes diferentes para el HTC y R744 en el LTC, y se compararon con un CRS operado con pares de

refrigerantes R744/R744 en modo subcrítico o transcrito (dependiendo de la temperatura ambiente). Sus resultados mostraron que el uso de un refrigerante diferente al R744 en el HTC es beneficioso, especialmente en climas cálidos. Los mejores rendimientos se alcanzaron con los refrigerantes R152a, NH₃, R1270, R290 y R600a, especialmente a altas temperaturas de condensación, sin encontrar una diferencia significativa entre ellos, finalmente los autores determinaron el COP promedio anual de la operación del CRS en una ciudad que presenta estaciones estableciendo que el máximo COP promedio anual con los pares de refrigerante R152a/R744 con un valor de 2.381, para una temperatura de evaporación de -35°C, sin embargo este presenta un GWP de 124.

En orden de mejorar el rendimiento de un CRS operado con R744/R744 como sustituto de un CRS operado con R744/R717, (Sun, Wang, Su, et al., 2019) propone evaluar la viabilidad de seis configuraciones de CRS operados con R744/R744 asistidos con expansores y sistema de subenfriamiento mecánico. Sus resultados mostraron que el uso de un expansor y subenfriamiento mecánico en el HTC mejora en promedio el rendimiento del CRS operado con R744/R744 en un 13,8% respecto a un CRS operado con R744/R717. El máximo COP obtenido con una temperatura de evaporación de -35°C fue de alrededor de 1.7. (Deymi-Dashtebayaz et al., 2021) presentaron un análisis de un CRS simple, evaluando seis pares de refrigerantes de bajo GWP (R41-R161, R41-R1234yf, R41-R1234ze, R744-R161, R744-R1234yf, R744-R1234ze), los autores encontraron que el máximo COP para una temperatura de condensación en el HTC de 40°C, y una temperatura de evaporación de -30 °C es determinado a una temperatura de condensación del LTC cercana a los 0°C, y para los seis pares de refrigerantes el COP varió ligeramente alrededor de 2.0.

La revisión de la literatura evidencia un gran interés en el estudio de CRS convencionales operados con

R744 en el LTC y refrigerantes de bajo GWP en el HTC, sin embargo, los rendimientos mostrados son aun menores que los alcanzados con refrigerantes de GWP moderado o alto, en ciclos CRS y VCRS convencionales. Algunos estudios proponen el uso de tanque flash (directo e indirecto) como mecanismo de mejora del COP , sin embargo, su evaluación está limitada a algunos pares de refrigerantes y no describen una comparación con un CRS convencional de tal forma que permita evaluar el impacto del uso del tanque flash sobre el rendimiento. En el presente trabajo se propone realizar una evaluación termodinámica de un CRS convencional y de un CRS con tanque flash en el LTC, bajo unas mismas condiciones de operación y utilizando refrigerante R744 en el LTC y refrigerantes R717, R161, R600A, R1234yf, R1233ze, R1234ze(E) y R1234ze(Z) en el HTC. Los resultados obtenidos permitirán proporcionar un mejor entendimiento para la correcta selección de pares refrigerantes y el efecto del tanque flash sobre el rendimiento del sistema de un CRS.

1. DESCRIPCION DEL SISTEMA

La 0 muestra el diagrama esquemático de un CRS y un CRS con tanque flash en el LTC. Ambos CRS constan de dos circuitos independientes (LTC y HTC), el fluido de trabajo en el LTC es R744, mientras que en el circuito HTC son los refrigerantes R454B, R600A, R1234yf y R1234ze.

CRS simple (Sistema 1)

En el CRS, el evaporador absorbe la carga de enfriamiento (Q_{evap}) en el LTC, mientras que el calor es rechazado hacia el ambiente en el condensador del HTC (Q_{cond}). El sistema 1 consta de un evaporador, un compresor 1 y una válvula de expansión 1 en el LTC, y un condensador, un compresor 2 y una válvula de expansión 2 en el HTC. El refrigerante del LTC entra al compresor 1 como vapor saturado (estado 1) y es comprimido hasta una cierta presión y sale como vapor sobrecalentado (estado 2). Al salir del compresor 1, el refrigerante del LTC entra a un intercambiador de calor que le permite intercambiar calor con el

refrigerante del HTC, al salir el refrigerante del LTC del intercambiador de calor (estado 3) como líquido saturado, este ingresa a la válvula de expansión 1 y se expande hasta la presión de baja para entrar en el evaporador como vapor saturado (estado 4). En el HTC, el refrigerante entra al compresor 2 como vapor saturado (estado 5), se comprime hasta la presión de condensación e ingresa al condensador del HTC (estado 6) donde rechaza calor hacia el ambiente hasta la condición de líquido saturado. Al salir del condensador (estado 7), el refrigerante ingresa a la válvula de expansión 2, se expande hasta la presión de baja del HTC (estado 8) e ingresa al intercambiador de calor para remover el calor proveniente del LTC.

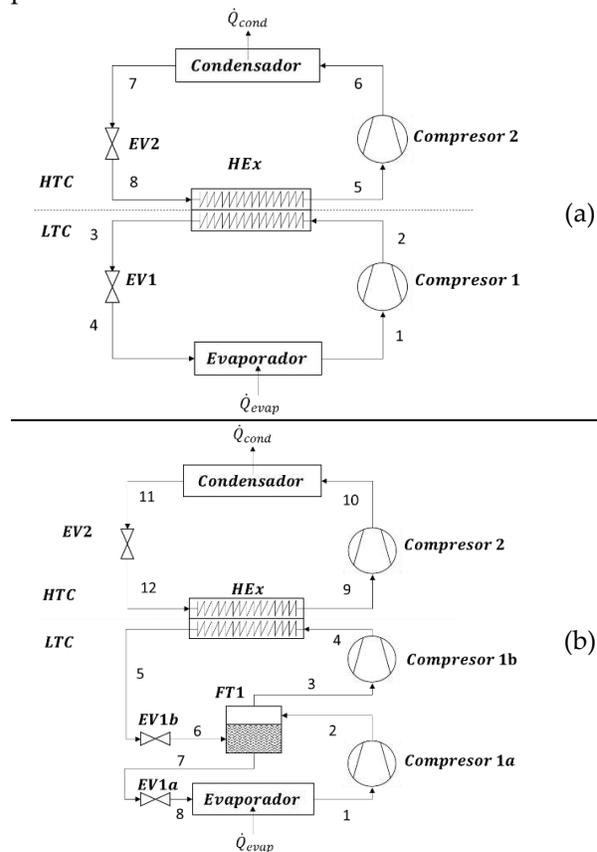


Figura 1. Diagrama esquemático de: (a) CRS simple (Sistema 1). (b) CRS con tanque flash

1.1. CRS con tanque flash (Sistema 2)

En el LTC del sistema 2 se establece un proceso de compresión de dos etapas utilizando un tanque flash como medio para llevar a cabo el

interenfriamiento requerido entre las etapas de compresión. Al salir el R744 del intercambiador de calor, se expande hasta una presión intermedia y en el tanque flash se separa el líquido del vapor. La fase líquida se expande hasta la presión de baja e ingresa al evaporador, mientras que el vapor saturado extraído del tanque flash se combina con el gas proveniente de la primera etapa de compresión causando un enfriamiento del mismo a presión constante.

2. ANALISIS TERMODINAMICO

Con el objetivo de simplificar los modelos para el análisis termodinámico de ambos sistemas, se establecieron las siguientes consideraciones:

1. El sistema opera en estado estable y las caídas de presión, pérdidas de calor y los cambios de energía cinética y potencial en todos los componentes y conexiones del sistema son despreciables.
2. La salida del gas refrigerante en el condensador y en el evaporador fueron considerados como líquido y vapor saturado, respectivamente.

Tabla 1. Eficiencia isentrópica

Refrigerante	Ecuación	
R744 (Amaris et al., 2019)	$\eta_s = 0.00476 \cdot r_p^2 - 0.09238 \cdot r_p + 0.8981$	[1]
R717 (Amaris et al., 2019; Sun, Wang, Su, et al., 2019)	$\eta_s = -0.00097 \cdot r_p^2 - 0.01026 \cdot r_p + 0.839550$	[2]
R454B, R600A, R1234yf y R1234ze (Sun, Wang, Xie, et al., 2019)	$\eta_s = 0.874 - 0.0135 \cdot r_p$	[3]

2.2. Ecuaciones de equilibrio

Basado en las consideraciones anteriormente mencionadas, las ecuaciones para el balance de energía y balance de exergía del sistema 1 y sistema 2 fueron establecidas. Estas se muestran en la 0 y 0.

2.3. Relación de presión, compresión multietapa LTC

De acuerdo a (López-Paniagua et al., 2020), la relación de presión óptima que minimiza el trabajo de compresión en un sistema multietapa con

3. Para el intercambiador de calor (*HEX*), la diferencia de temperatura entre el refrigerante del LTC y el refrigerante del HTC fue de 5°C.

4. Temperatura ambiente igual a 40°C. Temperatura del refrigerante a la salida del condensador igual a 45°C, es decir, 5 °C mayor a la temperatura ambiente.

5. Temperatura de evaporación evaluado a -20°C, -15°C, -10 °C, -5 °C y 0°C. Temperatura de aproximación en el evaporador igual a 5°C.

6. El proceso de expansión en cada válvula de expansión es isoentálpico.

7. El proceso de compresión no es isentrópico y su eficiencia isentrópica fue calculada como una función de la relación de presión (r_p).

8. Todos los flujos de energía y exergía fueron evaluados por unidad de masa de refrigerante del LTC.

2.1. Eficiencia isentrópica

La eficiencia isentrópica del compresor para el LTC y el HTC del CRS puede expresarse como una función de la relación de presión (r_p), como se ilustra en 0.

interenfriamiento se define como se presenta a continuación:

$$r_{p_{opt}} = r_{p_{total}}^{1/n} \quad [4]$$

2.4. Rendimiento del sistema

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica el coeficiente de rendimiento (COP) para un CRS se define como:

$$COP = \frac{q_{evap}}{w_1 + w_2} \quad [5]$$

2.5. Irreversibilidades y eficiencia exergética

La destrucción de exergía es calculada mediante un balance de exergía sobre cada componente del sistema. La destrucción total de exergía del CRS se define como:

$$x_{des} = \sum x_i \quad [6]$$

La eficiencia exergética del sistema se define como:

$$\eta_{ex} = 1 - \left(\frac{x_{des}}{w_1 + w_2} \right) \quad [7]$$

3. RESULTADOS Y DISCUSION

El comportamiento del COP, la eficiencia exergética y la destrucción total de exergía del sistema 1, para el grupo de pares de refrigerantes evaluados (R717, R161, R600A, R1234yf, R1233ze, R1234ze(E) y R1234ze(Z)), es similar, a medida que aumenta la temperatura de evaporación (T_{evap}) del LTC, aumenta el COP y la eficiencia exergética (η_{ex}), mientras que la destrucción total de exergía del sistema (x_{des}) disminuye. Como se muestra en la 0 (a) y (b), para una temperatura de evaporación del LTC dada, el COP y η_{ex} aumentan conforme aumenta la temperatura de condensación del LTC (T_{MC}), alcanza el punto de mayor rendimiento y luego disminuye, esto se debe a que al aumentar T_{MC} , el COP del LTC disminuye, mientras que el COP del HTC aumenta, ver 0 (d).

La irreversibilidad total del sistema 1 presenta también un punto de operación de mínima exergía destruida, ver 0 (c). Para cada uno de los pares de refrigerantes evaluados, en el rango establecido de T_{MC} , y a diferentes T_{evap} , se determinó el máximo COP y la máxima η_{ex} , el cual, fue alcanzado a T_{MC} entre -6.76 °C y 6.15 °C, la 0 muestra los valores máximos COP y η_{ex} para diferentes temperaturas de evaporación. El análisis termodinámico mostró que

para los diferentes pares de refrigerantes evaluados en el sistema 1, no existe una diferencia significativa en el máximo COP alcanzado, la desviación estándar de los valores de COP a -20 °C y 0 °C fue de 0.060 y 0.10, respectivamente. El refrigerante R1234ze(Z), presentó el mejor comportamiento en cuanto al máximo COP y la máxima η_{ex} para diferentes temperaturas de evaporación, a temperatura de evaporación de -20 °C y 0 °C el máximo COP y la máxima η_{ex} alcanzada fue de 2.155 y 45.91%, y 3.631 y 45.69%, respectivamente. Para una valor optimizado de T_{MC} , incrementar 5°C la temperatura de evaporación, supone en promedio, una mejora en el COP de 11.8%.

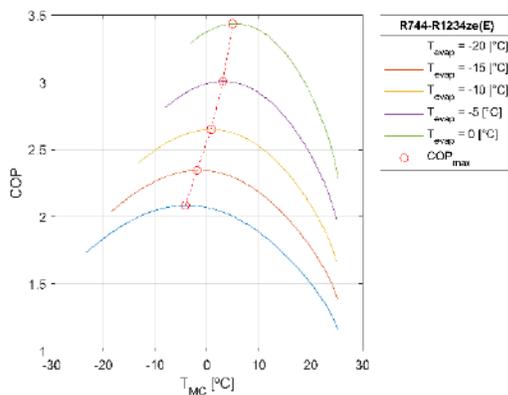
Los resultados del análisis termodinámico sobre el sistema 2 mostraron que el uso del tanque flash en el LTC, mejora notablemente el rendimiento de un CRS convencional. La pérdida de rendimiento causada por el incremento de T_{MC} en el LTC de un CRS convencional es compensada con la disminución del trabajo de compresión causada por la compresión multietapa con interenfriamiento. Los resultados mostraron un incremento máximo de hasta un 50,4% en comparación con el sistema 1, ver 0. A bajas T_{evap} , la mejora sobre el COP es más notoria que a altas T_{evap} , a 0°C se alcanzó un incremento máximo sobre el COP de 37,9%. EL uso del tanque flash mejoró el rendimiento del CRS convencional operado con el par de refrigerantes R744/R1234yf, quien en la evaluación del sistema 1 fue el que obtuvo el COP más bajo a T_{evap} de -20 °C, y T_{MC} optimizada, el COP fue de 2.008. Finalmente, se encontró que aunque no existe una diferencia significativa del COP del sistema 2 entre los diferentes pares de refrigerantes, la desviación estándar de los valores de COP se redujo en comparación con los resultados del sistema 1, es decir, la variabilidad del COP entre los diferentes pares de refrigerantes es aun menor, a -20 °C y 0 °C fue de 0.021 y 0.04, respectivamente.

Tabla 2. Ecuaciones de equilibrio para el balance de energía y exergía – sistema 1

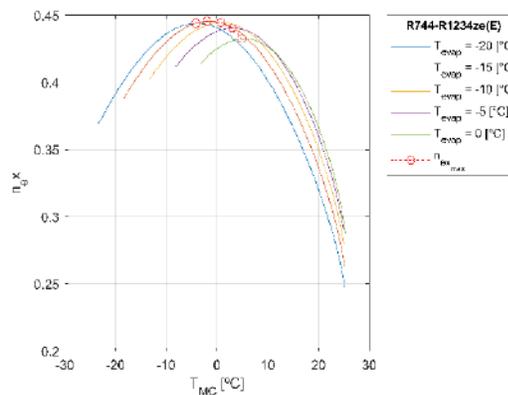
Circuito	Componente	Balace de energía		Balace de exergía	
LTC	COMP 1	$w_1 = (h_2 - h_1)$	[8]	$x_{comp1} = T_{amb} \cdot (s_2 - s_1)$	[15]
	EV 1	$h_3 = h_4$	[9]	$x_{ET1} = T_{amb} \cdot (s_8 - s_7)$	[16]
	Evaporador	$q_{evap} = (h_1 - h_4)$	[10]	$x_{evap} = T_{amb} \cdot \left[(s_1 - s_4) - \frac{q_{evap}}{T_e - \Delta T_{evap}} \right]$	[17]
HTC	COMP 2	$w_2 = \dot{m}_{HTC} \cdot (h_6 - h_5)$	[11]	$x_{comp2} = T_{amb} \cdot (s_6 - s_5)$	[18]
	EV 2	$h_7 = h_8$	[12]	$x_{EV2} = T_{amb} \cdot \dot{m}_{HTC} \cdot (s_8 - s_7)$	[19]
	Condensador	$q_{cond} = \dot{m}_{HTC} \cdot (h_6 - h_7)$	[13]	$x_{cond} = T_{amb} \cdot \dot{m}_{HTC} \cdot (s_7 - s_6) + q_{cond}$	[20]
LTC/HTC	HEX	$\dot{m}_{HTC} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8}$	[14]	$x_{HEX} = T_{amb} \cdot [(s_3 - s_2) + \dot{m}_{HTC} \cdot (s_5 - s_8)]$	[21]

Tabla 3. Ecuaciones de equilibrio para el balance de energía y exergía – sistema 2

Circuito	Componente	Balace de energía		Balace de exergía	
LTC	COMP 1a	$w_{1a} = (h_2 - h_1)$	[22]	$x_{comp1a} = T_{amb} \cdot (s_2 - s_1)$	[32]
	COMP 1b	$w_{1b} = (h_4 - h_3)$	[23]	$x_{comp1b} = T_{amb} \cdot (s_4 - s_3)$	[33]
	EV 1a	$h_5 = h_6$	[24]	$x_{ET1a} = T_{amb} \cdot (s_6 - s_6)$	[34]
	EV 1b	$h_7 = h_8$	[25]	$x_{ET1b} = T_{amb} \cdot (s_8 - s_7)$	[35]
	Evaporador	$q_{evap} = (h_1 - h_4)$	[26]	$x_{evap} = T_{amb} \cdot \left[(s_1 - s_8) - \frac{q_{evap}}{T_e - \Delta T_{evap}} \right]$	[36]
	Tanque Flash	$h_3 = h_6 + (1 - x_6) \cdot (h_2 - h_7)$	[27]	$x_{FT} = T_{amb} \cdot [(s_3 - s_6) + (1 - x_6) \cdot (h_2 - h_7)]$	[37]
HTC	Comp. 2	$w_2 = \dot{m}_{HTC} \cdot (h_{10} - h_9)$	[28]	$x_{comp2} = T_{amb} \cdot (s_{10} - s_9)$	[38]
	EV 2	$h_{11} = h_{12}$	[29]	$x_{EV2} = T_{amb} \cdot \dot{m}_{HTC} \cdot (s_{12} - s_{11})$	[39]
	Condensador	$q_{cond} = \dot{m}_{HTC} \cdot (h_{10} - h_{11})$	[30]	$x_{cond} = T_{amb} \cdot \dot{m}_{HTC} \cdot (s_{11} - s_{10}) + q_{cond}$	[40]
LTC/HTC	HEX	$\dot{m}_{HTC} = \frac{h_4 - h_5}{h_9 - h_{12}}$	[31]	$x_{HEX} = T_{amb} \cdot [(s_5 - s_4) + \dot{m}_{HTC} \cdot (s_9 - s_{12})]$	[41]



(a)



(b)

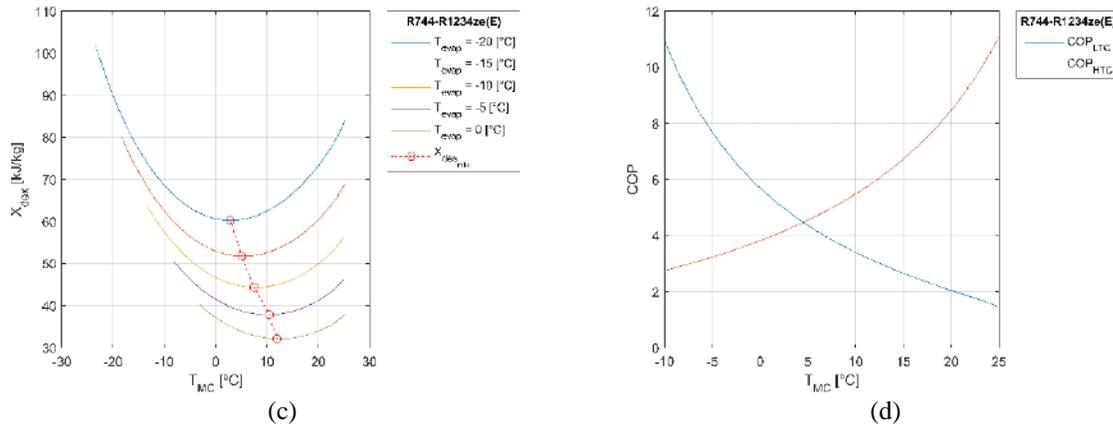


Figura 2. Comportamiento del CRS R744/R1234ze(E) respecto a T_{MC} .
(a) COP. (b) η_{ex} . (c) x_{des} . (d) $COP_{LTC} - COP_{HTC}$

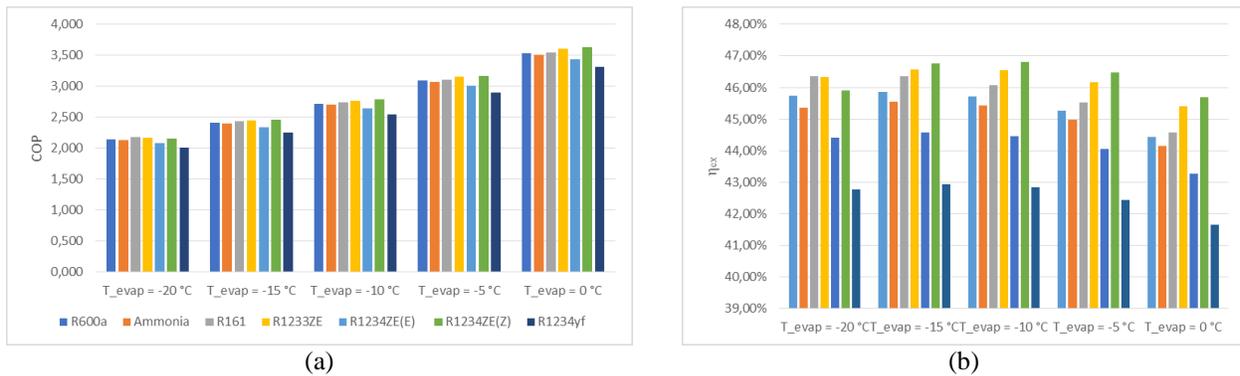


Figura 3. Rendimiento máximo del conjunto de refrigerantes en CRS. (a) COP_{max} . (b) $\eta_{ex,max}$.

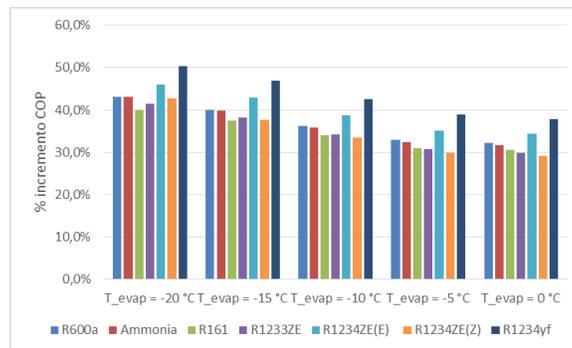


Figura 4. Porcentaje de incremento del COP del sistema 2 respecto al sistema 1.

4. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que es posible operar de forma eficiente y con un mínimo impacto sobre el calentamiento global, un ciclo de refrigeración por compresión de vapor con R744 como fluido de trabajo en climas tropicales mediante un sistema

CRS con refrigerantes de bajo GWP como R717, R161, R600A, R1234yf, R1233ze, R1234ze(E) y R1234ze(Z) en el HTC. El análisis termodinámico del sistema 1 mostró que indistintamente del par de refrigerantes utilizado, existe un punto de mayor rendimiento (COP y η_{ex}) el cual es alcanzado a una T_{MC} entre -6.76 °C y 6.15 °C, según sea el caso del

par de refrigerantes utilizado. De los pares de refrigerantes evaluados, el par R744/R1234ze(Z) presentó el mayor rendimiento y eficiencia exergética en el sistema 1, que el resto de pares refrigerantes, sin embargo, no se encontró una diferencia significativa en cuanto al rendimiento del resto de pares de refrigerantes evaluados. Para una T_{MC} óptima, la temperatura de evaporación en el LTC juega un papel clave sobre la mejora en el rendimiento termodinámico del sistema 1, incrementar 5°C la temperatura de evaporación, supone una mejora en el COP en promedio del 11.8%. El uso del tanque flash en LTC mejora notablemente el rendimiento de un CRS convencional, especialmente a bajas temperaturas de evaporación. El detrimento sobre el COP del LTC causado por el incremento de T_{MC} , es compensado por la disminución del trabajo de compresión al realizarse en etapas y adicionado interenfriamiento, mientras que el COP del HTC aumenta conforme aumenta T_{MC} , así, el COP global del sistema es incrementado.

NOMENCLATURA

SIGL	
AS	
COM	Compresor
P	
COP	Coefficiente de rendimiento
CRS	Ciclo de refrigeración en cascada
EV	Válvula de expansión
EV	Válvula de expansión
FT	Tanque flash
GWP	Potencial de calentamiento global
HEx	Intercambiador de calor
HFCs	hidrofluorocarbonos
HFOs	hidrofluoroolefinas
HTC	Circuito de alta temperatura
HVA	Calefacción, ventilación y aire acondicionado
C	
LT	Baja temperatura
LTC	Circuito de baja temperatura
MT	Media temperatura
SS-	Sistema de refrigeración por compresión de vapor de una etapa
VCRS	Sistema de refrigeración por compresión de vapor

SIMBOLOS

h	Entalpia, kJ/kg
\dot{m}_{HTC}	Flujo másico de refrigerante en el HTC, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} / \text{kg}_{R744}$
n	Número de etapas de compresión
η_s	Eficiencia isentrópica
P	Presión, MPa
q_{cond}	Calor de rechazo en el condensador, $\frac{\text{Kj}}{\text{kg}_{R744}}$
q_{evap}	Calor de absorbido en el evaporador, $\text{kJ} / \text{kg}_{R744}$
r_p	Relación de presión
s	Entalpia, kJ/kgK
T	Temperatura, °C
T_{evap}	Temperatura de evaporación LTC, °C
T_{MC}	Temperatura de condensación del LTC, °C
w	Trabajo específico de compresión, $\text{kJ} / \text{kg}_{R744}$
x_i	Exergía destruida del componente i , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{R744}}$
x_{des}	Exergía total destruida, $\text{kJ} / \text{kg}_{R744}$

REFERENCIAS

- Alajmi, A., & Zedan, M. (2020). Energy, cost, and environmental analysis of individuals and district cooling systems for a new residential city. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101976. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101976>
- Amaris, C., Tsamos, K. M., & Tassou, S. A. (2019). Analysis of an R744 typical booster configuration, an R744 parallel-compressor booster configuration and an R717/R744 cascade refrigeration system for retail food applications. Part 1: Thermodynamic analysis. *Energy Procedia*, 161, 259–267. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2019.02.090>
- Balboa-Fernández, M., de Simón-Martín, M., González-Martínez, A., & Rosales-Asensio, E. (2020). Analysis of District Heating and Cooling systems in Spain. *Energy Reports*, 6, 532–537. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2020.11.202>
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2019). A Theoretical Comparative Study of CO2 Cascade Refrigeration Systems. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 790, 9(4), 790. <https://doi.org/10.3390/APP9040790>
- Belusko, M., Liddle, R., Alemu, A., Halawa, E., & Bruno, F. (2019). Performance Evaluation of a CO2 Refrigeration System Enhanced with a Dew Point Cooler. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 1079, 12(6), 1079. <https://doi.org/10.3390/EN12061079>
- Ben Jemaa, R., Mansouri, R., Boukholda, I., & Bellagi, A. (2017). Energy and exergy investigation of R1234ze as R134a replacement in vapor compression chillers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(17), 12877–12887. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.12.010>
- Biardeau, L. T., Davis, L. W., Gertler, P., & Wolfram, C. (2019). Heat exposure and global air conditioning. *Nature*

- Sustainability* 2019 3:1, 3(1), 25–28. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0441-9>
- Bruno, F., Belusko, M., & Halawa, E. (2019). CO2 Refrigeration and Heat Pump Systems—A Comprehensive Review. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 2959, 12(15), 2959. <https://doi.org/10.3390/EN12152959>
- Deymi-Dashtebayaz, M., Sulin, A., Ryabova, T., Sankina, I., Farahnak, M., & Nazeri, R. (2021). Energy, exergoeconomic and environmental optimization of a cascade refrigeration system using different low GWP refrigerants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106473. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106473>
- Dincer, I., & Abu-Rayash, A. (2020). Community energy systems. In *Energy Sustainability* (pp. 101–118). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819556-7.00005-X>
- Domanski, P. A., Brignoli, R., Brown, J. S., Kazakov, A. F., & McLinden, M. O. (2017). Low-GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. *International Journal of Refrigeration*, 84, 198–209. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2017.08.019>
- Emani, M. S., & Mandal, B. K. (2018). The Use of Natural Refrigerants in Refrigeration and Air Conditioning Systems: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012064>
- Hampo, C. C., Akmar, A. B., & Majid, M. A. A. (2021). Life Cycle Assessment of an Electric Chiller Integrated with a Large District Cooling Plant. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 389, 13(1), 389. <https://doi.org/10.3390/SU13010389>
- Heredia-Aricapa, Y., Belman-Flores, J. M., Mota-Babiloni, A., Serrano-Arellano, J., & García-Pabón, J. J. (2020). Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A. *International Journal of Refrigeration*, 111, 113–123. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2019.11.012>
- Jemni, N., Elakhdar, M., Nehdi, E., & Kairouani, L. (2015). Performance Investigation of Cascade Refrigeration System Using CO2 and Mixtures. <http://Dx.Doi.Org/10.1142/S2010132515500224>, 23(3). <https://doi.org/10.1142/S2010132515500224>
- Kharseh, M., Altorkmany, L., Al-Khawaj, M., & Hassani, F. (2014). Warming impact on energy use of HVAC system in buildings of different thermal qualities and in different climates. *Energy Conversion and Management*, 81, 106–111. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.02.001>
- Longo, G. A., Mancin, S., Righetti, G., & Zilio, C. (2015). HFC32, a low GWP substitute for HFC410A in medium size chillers and heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 53, 62–68. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2015.01.014>
- López-Paniagua, I., Rodríguez-Martín, J., Sánchez-Orgaz, S., & Roncal-Casano, J. J. (2020). Step by Step Derivation of the Optimum Multistage Compression Ratio and an Application Case. *Entropy* 2020, Vol. 22, Page 678, 22(6), 678. <https://doi.org/10.3390/E22060678>
- Maina, P., & Huan, Z. (2015). A review of carbon dioxide as a refrigerant in refrigeration technology. *South African Journal of Science*, 111(9/10), 10–10. <https://doi.org/10.17159/SAJS.2015/20140258>
- Massuchetto, L. H. P., Nascimento, R. B. C. do, de Carvalho, S. M. R., de Araújo, H. V., & d'Angelo, J. V. H. (2019). Thermodynamic performance evaluation of a cascade refrigeration system with mixed refrigerants: R744/R1270, R744/R17 and R744/RE170. *International Journal of Refrigeration*, 106, 201–212. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2019.07.005>
- McLinden, M. O., Seeton, C. J., & Pearson, A. (2020). New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration. *Science*, 370(6518), 791–796. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABE3692>
- Mohsin Tanveer, M., & Bradshaw, C. R. (2021). Performance evaluation of low-GWP refrigerants in 1–100 ton scroll compressors. *International Journal of Refrigeration*, 129, 317–331. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2021.05.008>
- Mosaffa, A. H., Farshi, L. G., Infante Ferreira, C. A., & Rosen, M. A. (2016). Exergoeconomic and environmental analyses of CO2/NH3 cascade refrigeration systems equipped with different types of flash tank intercoolers. *Energy Conversion and Management*, 117, 442–453. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.03.053>
- Nebot-Andrés, L., Llopis, R., Sánchez, D., Catalán-Gil, J., & Cabello, R. (2017). CO2 with Mechanical Subcooling vs. CO2 Cascade Cycles for Medium Temperature Commercial Refrigeration Applications Thermodynamic Analysis. *Applied Sciences* 2017, Vol. 7, Page 955, 7(9), 955. <https://doi.org/10.3390/APP7090955>
- Papakostas, K. T., & Slini, T. (2017). Effects of Climate Change on the Energy Required for the Treatment of Ventilation Fresh Air in HVAC Systems the Case of Athens and Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 852–859. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2017.03.171>
- Qiu, A., Yan, Z., Deng, Q., Liu, J., Shang, L., & Wu, J. (2020). Modeling of HVAC Systems for Fault Diagnosis. *IEEE Access*, 8, 146248–146262. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015526>
- Sun, Z., Wang, Q., Su, D., Liu, S., & Dai, B. (2019). Comparative analysis of thermodynamic performance of CO2 cascade refrigeration system assisted with expander and mechanical subcooling. *International Journal of Energy Research*, 43(14), 7891–7907. <https://doi.org/10.1002/ER.4719>
- Sun, Z., Wang, Q., Xie, Z., Liu, S., Su, D., & Cui, Q. (2019). Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system. *Energy*, 170, 1170–1180. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.12.055>
- Thakar, K., Patel, R., & Patel, G. (2021). Techno-economic analysis of district cooling system: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127812. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127812>
- Zolcer Skačanová, K., & Battesti, M. (2019). Global market and policy trends for CO2 in refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 107, 98–104. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2019.08.010>

Almacenamiento Térmico de Energía por Medio de Hielo para Sistemas de Aire Acondicionado

Rolnan Fontalvo¹

rolnan.fontalvo@tranetechnologies.com

RESUMEN

El aire acondicionado de edificios comerciales durante el horario diurno es el mayor contribuyente de consumo eléctrico en horario de alta demanda. Por la tarde, mientras se requiere de aire acondicionado adicional para mantener las temperaturas de confort deseadas, el aumento de la demanda eléctrica se agrega a la carga ya creada por la iluminación, la operación del equipo, las computadoras y muchas otras fuentes de energía.

Un Sistema de Almacenamiento Térmico de Energía, es una tecnología que desplaza la carga eléctrica a horas de baja demanda, lo cual no sólo reduce los cargos energéticos y de demanda, sino también reduce el valor total de consumo energético. El sistema utiliza unidades enfriadoras estándar para producir hielo en estado sólido durante la noche durante los períodos de baja demanda, cuando las cargas eléctricas se encuentran al mínimo. La capacidad generadora del proveedor eléctrico no se emplea mucho durante la noche y, consecuentemente, las tarifas se reducen a su nivel más bajo. El hielo se produce y se almacena en tanques de hielo modulares para proveer enfriamiento que ayudará a cumplir, al día siguiente, con el requerimiento de carga del equipo de aire acondicionado del edificio, y permitir de tal forma reducir o apagar las unidades enfriadoras.

El Almacenamiento Térmico es un método comprobado para la reducción de costos operativos y actualmente hay un proyecto en Colombia. Los Sistemas de Banco de Hielo no sólo pueden reducir costos operativos, sino que también pueden reducir las inversiones de capital cuando los sistemas están debidamente diseñados para nuevos edificios. Es posible especificar unidades enfriadoras de la mitad de tamaño que funcionen 20-24 horas al día, en lugar de lo convencional.

¹ Trane de Colombia, Gerente de Cuenta, Bogotá, Colombia; 313 3039059; rolnan.fontalvo@tranetechnologies.com

ABSTRACT

Air conditioning (AC) is the highest contributor to electrical power consumption during daytime high demand schedules in commercial buildings. In the afternoon, an additional AC power consumption is required to maintain thermal comfort, in addition to the demand created by lighting, electrical appliances and other electrical power consumption sources.

A Thermal Storage System (TSS) displaces part of the electrical consumption to low demand schedules by using an alternate way to cool down the working spaces, hence reducing the load generated by the AC systems and, therefore, its billings. The TSS harnesses standard chillers to produce ice during the low demand schedules, where both the electrical load and the electrical fares are low. Produced ice is stored in modular tanks for further air conditioning purposes, easing the load on the AC units.

Thermal Storage is a proven method to reduce operative costs and, currently, there is a project in Colombia. Ice Bank Systems can not just reduce operative costs, but also reduce investments for accurately designed systems for new buildings. It is possible to dimension chillers half the size that operate from 20 to 24 hour a day instead of the conventional

Palabras Clave

Tanques de Hielo, Almacenamiento, Energía, Reducción Costos, Control

INTRODUCCIÓN

El aire acondicionado de edificios comerciales durante el horario diurno, es el mayor contribuyente singular de consumo eléctrico en horario de alta demanda. Por la tarde, mientras se requiere de aire acondicionado adicional para mantener las temperaturas de confort deseadas, el aumento de la demanda eléctrica se agrega a la carga ya creada por la iluminación, la operación del equipo, las computadoras y muchas otras fuentes de energía. Lo anterior requiere, por parte de los proveedores de energía, una aportación adicional más costosa de equipo generador en línea, para manejar el incremento de la demanda; aunque hoy en día en Colombia no hay diferencia horaria, la inversión inicial en capacidad instalada para el consumo de kWh es considerablemente menor con la aplicación de almacenamiento térmico, debido al balance de la carga que se realiza con el sistema y la disminución de los "horarios picos" de consumo en la curva de cargas térmicas de cada proyecto, dependiendo de la tipología del mismo.

Existen múltiples proyectos de distritos térmicos con la aplicación de almacenamiento térmico en otros países y sería importante tener los fundamentos presentes de la tecnología para la aplicabilidad en Colombia, debido que, ya es una realidad la instalación de los mismos, basado en la experiencia actual del primer proyecto en Bogotá y la expansión de una segunda etapa como consolidación de la tecnología.

1. ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE ENERGÍA POR MEDIO DE HIELO

Un Sistema de Almacenamiento de Hielo, (Ice Bank®) comúnmente conocido como Almacenamiento Térmico de Energía, es una tecnología que desplaza la carga eléctrica a horas valle (de baja demanda), lo cual no sólo reduce los cargos energéticos y de demanda durante el suministro de aire acondicionado, sino también reduce el valor total de consumo energético (kWh). El sistema utiliza una unidad enfriadora estándar para producir hielo en estado sólido durante la noche durante los períodos de baja demanda,

cuando las cargas eléctricas se encuentran al mínimo. El hielo se produce y se almacena en tanques de hielo modulares para proveer enfriamiento que ayudará a cumplir, al día siguiente, con el requerimiento de carga del equipo de aire acondicionado del edificio, y permitir de tal forma reducir o apagar las unidades enfriadoras. El Almacenamiento Térmico es un método comprobado para la reducción de costos operativos con más de 6000 instalaciones en el mundo. Los Sistemas de Banco de Hielo no sólo pueden reducir costos operativos, sino que también pueden reducir sustancialmente las inversiones de capital cuando los sistemas están debidamente diseñados para nuevos edificios comerciales e industriales. Los ingenieros pueden especificar unidades enfriadoras de mitad de tamaño que funcionen 20-24 horas al día, en lugar de enfriadoras de tamaño completo que funcionen sólo 10 a 12 horas del día. En aplicaciones de conversión, un Sistema de Almacenamiento Térmico de Banco de Hielo puede proveer con frecuencia enfriamiento para cargas adicionales o incrementadas de un edificio, sin necesidad de aumentar la capacidad de las unidades enfriadoras.

El almacenamiento de energía es la captura de energía producida en un tiempo determinado para hacer uso en otro. el dispositivo que almacena energía es a veces llamado acumulador.

En el diseño convencional del sistema de aire acondicionado, las cargas de enfriamiento se miden en términos de requerimiento de "Toneladas de Refrigeración" (o kW's) o simplemente "Toneladas". Los sistemas de Almacenamiento Térmico, sin embargo, se miden por el término "Toneladas-Horas" (o kW-h). La Figura 1 representa una carga térmica teórica de 100 toneladas mantenida durante 10 horas, o una carga térmica de 1000 toneladas-hora. Cada uno de los 100 cuadritos en el diagrama representa 10 toneladas-hora. En realidad, ningún sistema de aire acondicionado de un edificio opera a 100% de capacidad durante el ciclo de enfriamiento total diario. Las cargas de aire acondicionado alcanzan

su punto de alta demanda por la tarde – generalmente de 2 a 4 PM – cuando las temperaturas ambiente se encuentran más altas. La Figura 3 representa un perfil de carga de aire acondicionado de un edificio típico durante un día de diseño.

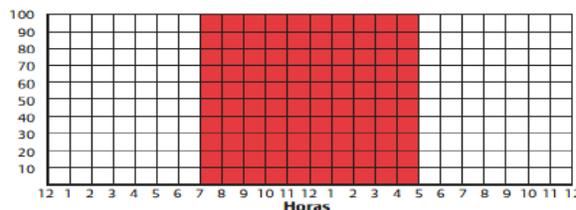


Figura 1. Diagrama Toneladas vs. Horas Inicial

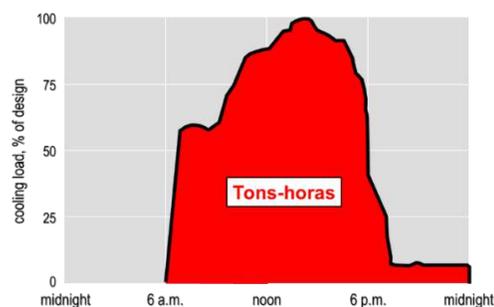


Figura 2. Carga del Edificio – Día normal real

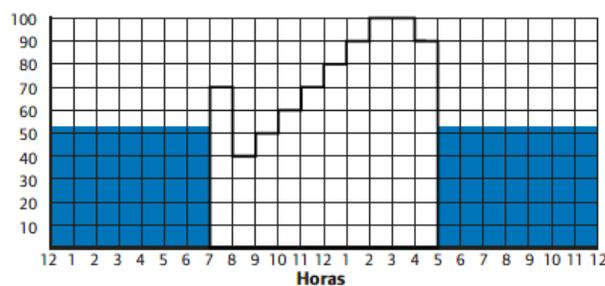


Figura 3. Perfil de carga de aire acondicionado de un edificio típico durante un día de diseño

Como podrá verse, se requiere la capacidad total de una enfriadora de 100 toneladas durante sólo dos horas, para el ciclo de enfriamiento. Para las otras ocho horas restantes, se requiere menos de la capacidad total de una unidad enfriadora. Si se cuentan los cuadritos entintados, sumarán un total de 75, cada uno representando 10 toneladas-hora. Sin embargo, deberá especificarse una enfriadora de 100 toneladas para poder manejar la carga de refrigeración pico (alta demanda) de 100 toneladas.

El “Factor de Diversidad” se define como la proporción de la carga de refrigeración actual a la capacidad potencial total de la enfriadora, o bien:

$$\begin{aligned} \text{Factor de Diversidad (\%)} &= \frac{\text{Actual Ton} - \text{Hr}}{\text{Total potencial Ton} - \text{Hr}} \\ &= \frac{750}{1000} \end{aligned} \quad [1]$$

Esta unidad enfriadora tiene entonces un Factor de Diversidad del 75 por ciento. Tiene la capacidad de proveer 1000 toneladas-hora cuando se requieren sólo 750 toneladas-hora. Si el Factor de Diversidad resulta bajo, el coeficiente de rentabilidad del sistema resulta también bajo. (A más bajo Factor de Diversidad, mayor será el beneficio potencial de un sistema de Almacenamiento Térmico).

Al dividir el total de toneladas-hora del edificio por el número de horas de operación de la enfriadora, se arroja la carga promedio del edificio a través del ciclo de enfriamiento. Si la carga de aire acondicionado pudiera trasladarse a las horas valle, o nivelarse a la carga promedio, se requeriría menor capacidad de la enfriadora, se alcanzaría el 100 por ciento de diversidad, y se obtendría un mejor coeficiente de rentabilidad.

1.1. ¿Almacenamiento Completo o Almacenamiento Parcial?

Existe una variedad de estrategias de control que pueden utilizarse para aprovechar el beneficio del Almacenamiento Térmico. Sin embargo, existen dos planteamientos básicos que definen los límites comunes del diseño del sistema. Las tarifas por consumo eléctrico determinarán aquellas estrategias de control que sean mejores para el proyecto. Cuando las tarifas eléctricas justifican un cambio completo de las cargas del aire acondicionado, una unidad enfriadora de tamaño convencional puede utilizarse con suficiente almacenamiento energético para trasladar la carga completa a las horas valle (baja demanda). Esto se conoce como sistema de Almacenamiento Completo y se utiliza con mayor frecuencia en aplicaciones de conversión con el uso de la capacidad de la enfriadora existente. La Figura 3

muestra el perfil de carga de aire acondicionado del mismo edificio, pero ahora habiéndole trasladado completamente la carga de enfriamiento a 14 horas valle (baja demanda). La unidad enfriadora se utiliza para almacenar hielo en tanques de Banco de Hielo durante la noche. La energía de 32°F almacenada en el hielo ahora provee las 750 toneladas-hora requeridas de refrigeración durante el día. La carga promedio ha sido reducida a 53.6 toneladas (750 toneladas-hora ÷ 14 = 53.6). La unidad enfriadora no trabaja durante todo el día, lo cual reduce de manera significativa las cargas de demanda.

En las nuevas construcciones, un sistema de Almacenamiento Parcial generalmente representa la estrategia de manejo de carga más práctica y costeable. En este caso, se permite la operación de una unidad enfriadora mucho más chica durante cualquier hora del día, debido a que carga los tanques de almacenamiento de hielo durante la noche y enfría la carga durante el día con la ayuda del enfriamiento almacenado. La extensión de las horas de operación de 14 a 24, produce la carga promedio más baja posible (750 toneladas-hora ÷ 24 = 31.25) como se ilustra con línea interrumpida en la Figura 4. Las cargas por demanda se reducen significativamente y la capacidad de la enfriadora también puede disminuirse con frecuencia en un 50 o 60 por ciento, o más. Cabe destacar que aunque la carga promedio de 24 horas del edificio es de 31.2 toneladas, la capacidad real de la unidad enfriadora es ligeramente más alta durante el día y más baja durante la noche. Esto se debe a la capacidad reducida de 30 a 35 por ciento de producción de hielo como se describe en la siguiente sección. (Lo anterior no debe confundirse con una disminución de eficiencia).

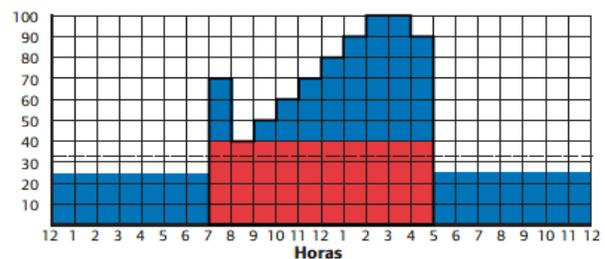


Figura 4. Ajuste de cargas con el Almacenamiento de Hielo

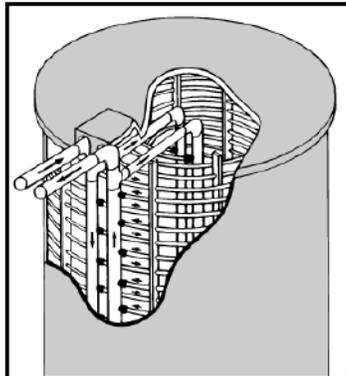


Figura 5. Intercambiador Interno de Tanque de Polietileno

1.2. Funcionamiento del Sistema de Banco de Hielo (Ice Bank®)

El elemento esencial del Sistema CALMAC® Ice Bank es un tanque de polietileno modular, aislado, que contiene un intercambiador de calor hecho de tubo de plástico en forma espiral rodeado de agua. El tanque se obtiene en diversos tamaños que van de 45 a más de 500 toneladas-hora. Por la noche, el agua que contiene 25% de etilenglicol se enfría por una unidad enfriadora, para luego circular a través del intercambiador de calor que extrae el calor hasta dejar eventualmente cerca del 95% del agua en estado sólido congelado. El hielo se produce uniformemente en el tanque debido al efecto patentado de promedio de temperatura producido por tubería de contra-flujo del intercambiador de calor colocada entre espacios estrechos (Figura 5).

Durante el proceso de congelamiento, el agua no se ve rodeada de hielo, lo cual le permite moverse libremente durante la formación del hielo, evitando de tal forma dañar el tanque. Las Figuras 6 y 7 muestran diagramas típicos de flujo para un sistema de Almacenamiento Parcial. Por la noche, la disolución de agua-glicol circula a través de la unidad enfriadora y el intercambiador de calor del tanque, desviándose del serpentín de aire de la manejadora de aire. Al día siguiente, el hielo almacenado enfría la disolución de 52°F a 34°F. Una válvula de modulación de temperatura fijada a 44°F

en un circuito de desvío alrededor del tanque, permite una cantidad suficiente de fluido de 52° desviarse del tanque, mezclarse con fluido de 34°, y alcanzar la temperatura deseada de 44°F. El fluido de 44°F ingresa al serpentín, en donde enfría el aire normalmente de 75°F a 55°F. El fluido sale del serpentín a 60°, ingresa a la unidad enfriadora, y se enfría a 52°F. Cabe notar que, mientras se produce hielo durante la noche, la unidad enfriadora debe enfriar la disolución de agua-glicol a 25°F, en lugar de producir temperaturas del agua de 44°F o 45°F requeridas para sistemas convencionales de acondicionamiento del aire. Esto tiene un efecto de “disminución” de la capacidad nominal de la enfriadora en aproximadamente 30 a 35 por ciento. Sin embargo, la eficiencia del compresor variará sólo ligeramente (ya sea mejor o peor) debido a que las temperaturas nocturnas reducidas producen temperaturas de condensación más frías y ayudan a mantener la unidad enfriadora operando eficientemente. La válvula de modulación de temperatura en el circuito de desvío ofrece la ventaja adicional de proveer control ilimitado de capacidad.

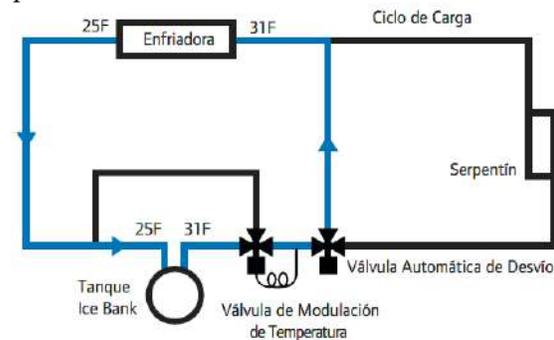


Figura 6. Modo almacenamiento de energía

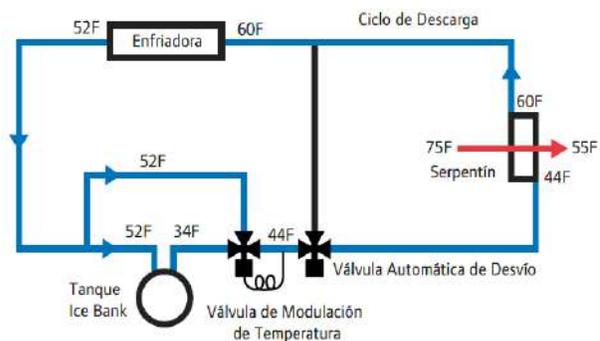


Figura 7. Modo suministro de energía al sistema

Nótese que el glicol recomendado para la disolución es un refrigerante industrial basado en etilenglicol el cual está formulado especialmente debido a su baja viscosidad y propiedades superiores de transferencia de calor. Estas propiedades contienen un sistema inhibidor anticorrosivo de componente múltiple que permite el uso de bombas, sellos y serpentines de sistema estándar. Debido a la ligera diferencia en el coeficiente de transferencia de calor entre agua-glicol y agua simple, podría ser necesario reducir la temperatura del líquido de suministro en uno o dos grados. Esto se logra fácilmente por el hielo.

1.3. Por qué puede reducir costos del aire acondicionado y del consumo de energía

1.3.1. Operación constante a plena carga

El ciclado de encendido-apagado y la modulación de capacidad sucede a través del día en la mayoría de los sistemas de aire acondicionado en respuesta a la carga de enfriamiento del edificio. Por lo tanto, la mayoría de sistemas de aire acondicionado operan dentro de su rango más eficiente a un porcentaje menor del 25 por ciento del tiempo. Con el Sistema de Banco de Hielo, la enfriadora trabaja a carga plena o cerca de carga plena (eficiencia pico) continuamente, de manera que elimina el ciclado ineficiente que acompaña la operación a carga parcial.

1.3.2. Temperaturas nocturnas de condensación

Las enfriadoras de condensación por aire se desempeñan con mayor eficiencia cuando las temperaturas exteriores son relativamente bajas, caso de Bogotá en Colombia, lo que naturalmente ocurre durante las horas nocturnas más frías. La operación nocturna con temperaturas de condensación más bajas de 20 grados puede mejorar la eficiencia energética en aproximadamente un 2 a 8 por ciento sobre sistemas no-almacenados que operan durante el día.

1.3.3. Distribución de aire frío

El uso de aire de 44°F en el sistema de ductos en lugar del valor común de aire de 55°F, ofrece un gran ahorro adicional en costos iniciales y operativos. Este aire más frío se alcanza entubando la disolución de agua-glicol de baja temperatura (36-38°F), desde los tanques de Banco de Hielo, hacia el serpentín de la manejadora de aire. El aire de 44°F se utiliza como aire primario y se distribuye a un difusor de alto índice de inducción, o a una caja de mezcla accionada por ventilador, dentro de la cual se mezcla con el aire del cuarto para obtener la temperatura deseada de la habitación. El aire primario de 44°F requiere flujo de aire mucho más bajo del aire de 55°F. Consecuentemente, el tamaño y costo de las manejadoras de aire, motores, ductos y bombas puede reducirse en un 20 a 40 por ciento. El aire más frío también reduce la humedad relativa por cuyo motivo los ocupantes sienten mayor confort ante ajustes más altos de termostato de ahorro energético. El Instituto de Investigación de Energía Eléctrica reporta que “los costos operativos generales de HVAC pueden reducirse en un 20 a 60 por ciento con el uso de almacenamiento de hielo y distribución de aire frío”. (Folleto EPRI CU-2038 “Cold Air Distribution with Ice Storage” July 1991).

1.3.4 Instalación rápida, bajo mantenimiento

Los Bancos de Hielo son unidades modulares compactas de construcción fabril que se embarcan e instalan con facilidad. No contienen partes móviles, no contienen materiales corrosibles, y se encuentran respaldados con garantía acordada por el fabricante. Los tanques pueden colocarse en el interior, en el exterior, o bien pueden apilarse o enterrarse para guardar espacio. También pueden moverse de lugar fácilmente si fuera requerido durante la expansión futura del edificio.

CONCLUSIONES

La instalación de tanques de hielo representa un gasto adicional en comparación con un sistema

convencional la cual regularmente es absorbido por la disminución del tamaño de los equipos y los ahorros generados.

Los mejores resultados en la implementación de hielo se generan cuando se tiene más consumo en horario punta, con una curva de carga dispareja y poco uniforme.

El sistema de generación de hielo no es recomendable para operación 24 horas.

Es necesario conocer el perfil de carga del edificio para la generación de una buena estrategia de operación del sistema.

En la implementación de este tipo de sistemas es necesaria la buena operación y mantenimiento regular al sistema de control ya que es parte medular del sistema.

El Almacenamiento Total y Parcial son dos estrategias comunes del Almacenamiento de Hielo usado en la actualidad. La estrategia más rentable y flexible es el almacenamiento parcial. El almacenamiento parcial puede ayudar con crecimiento redituable a medida que las instalaciones se van ocupando o se van ampliando. Un método efectivo de almacenamiento parcial puede aplicarse con el "dimensionamiento apropiado". Esta estrategia de almacenamiento parcial minimiza el riesgo y maximiza el ahorro y la simplicidad operacionales. Una estrategia de control sencilla y económica que utilice el restablecimiento del agua helada puede permitir al sistema de Almacenamiento de Hielo trasladarse de prioridad de enfriamiento, a prioridad de fabricación de hielo, en conformidad con la ocupación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece inicialmente al fabricante de equipos para climatización que el autor del presente trabajo representa con orgullo, Trane, por permitir dar a conocer la innovación en tecnologías desarrolladas con éxito desde décadas a nivel mundial.

A su vez a los profesionales, compañeros y amigos Fernando Campos y Mark Johnson, quienes han tenido toda la disposición para estar presentes cada vez que necesito un apoyo sobre las nuevas tecnologías.

REFERENCIAS

Andrepoint, J.S., Reducing energy costs and minimizing capital requirements: case studies of thermal energy storage (TES). In: Proceedings of the IETC (Industrial Energy Technology Conference), May 2007.

Andrepoint, J.S., Thermal energy storage: analysis and optimization of campus cooling systems. In: Proceedings of CAPP (Central APPA) Technology 2001, February 2001.

Tabors Caramanis & Associates, Source energy and environmental impacts of thermal energy storage. Report for the Thermal Energy Storage Systems Collaborative of the California Energy Commission, September 1995.

Reindl, D.T., et al., Characterizing the marginal basis source energy emissions associated with comfort cooling systems. Report No. TSARC 94-1, University of Wisconsin HVAC&R Center, Madison, Wisconsin, December 1994.

Folleto EPRI CU-2038 "Cold Air Distribution with Ice Storage" July 1991

Gansler, R., Energy and environmental impacts of space conditioning systems. Report on ASHRAE Research Project 991-RP, University of Wisconsin HVAC&R Center, Madison, Wisconsin, August 1999.

Viabilidad de usar energía solar en distritos de enfriamiento en las seis regiones de Colombia

Ricardo Chegwin^{1*}; Andrés Padilla²; Natalia Algarin³

María Consuegra⁴; Iván Tovar⁵

¹Ricardo.chegwin@uautonoma.edu.co; ²Andres.padilla74@uac.edu.co; ³Natalia.algarin@uac.edu.co

⁴Maria.consuegra1@uac.edu.co; ⁵Ivan.Tovar@uac.edu.co

RESUMEN

Los avances tecnológicos recientes en los sistemas solares para la generación de energía térmica y eléctrica han estado reduciendo sus costos y promovido su uso en remplazo a las energías fósiles, no renovables. La Energía solar fotovoltaica y el uso de la energía solar térmica para la producción de agua caliente o fría son ampliamente utilizadas en los distritos térmicos de hoy. La energía solar renovable en las 6 regiones de Colombia es un recurso abundante, característico del clima intertropical presente en el territorio nacional. La presente investigación establece los potenciales usos de la energía solar fotovoltaica en las diferentes regiones de Colombia para alimentar los enfriadores de agua. Se determinó la rentabilidad de implementar un sistema de energía solar para un distrito de 2000 TR destinado al sector residencial. Se determinó que los tres aspectos fundamentales para determinar la viabilidad económica del proyecto son: la curva de demanda de enfriamiento, la tarifa de electricidad y las condiciones climáticas externas. Resulta importante optimizar el dimensionamiento del sistema solar, de tal forma que no existan excedentes de energía en ninguna hora del día, lo que conllevaría a obtener rentabilidades menores y paybacks mayores. El rango de ahorros en energía determinado para las diversas ciudades analizadas varía desde un 19% hasta un 47%, las rentabilidades varían desde un 9.3 % hasta un 21.5%, y los retornos de la inversión varían desde 6 años hasta 11 años.

ABSTRACT

Recent technological advances in solar systems for the generation of thermal and electrical energy have

¹ Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia; Ricardo.chegwin@uautonoma.edu.co

² Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia; Andres.padilla74@uac.edu.co

³ Programa de ingeniería Mecatrónica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia; Natalia.algarin@uac.edu.co

⁴ Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia; Maria.consuegra1@uac.edu.co

⁵ Programa de ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia; Ivan.Tovar@uac.edu.co

been reducing their costs and promoting their use in place of fossil, non-renewable energies. Photovoltaic solar energy and the use of solar thermal energy for the production of hot or cold water are widely used in today's thermal districts. Renewable solar energy in the 6 regions of Colombia is an abundant resource, characteristic of the intertropical climate present in the national territory. This research establishes the potential uses of photovoltaic solar energy in the different regions of Colombia to feed air cooled chillers. The profitability of implementing a solar energy system for a 2000 TR district destined for the residential sector was determined. It was found that the three fundamental aspects to determine the economic viability of the project are: the cooling demand curve, the electricity tariff and the external climatic conditions. It is important to optimize the sizing of the solar system, in such a way that no energy is wasted at any time of the day, which would lead to lower returns and higher paybacks. The range of energy savings determined for the various cities analyzed varies from 19% to 47%, the returns vary from 9.3% to 21.5%, and the paybacks varied from 6 to 11 years.

Palabras Clave: Distritos de Enfriamiento, Eficiencia, Regiones de Colombia, Energía Térmica Solar, Energía Solar Fotovoltaica, enfriadores de agua (Chillers) eléctricos y por absorción.

INTRODUCCIÓN

La refrigeración por energía solar es una alternativa atractiva ya que permite eliminar la mayoría de los efectos nocivos de las máquinas frigoríficas tradicionales y además los picos de la demanda de refrigeración usualmente coinciden la mayor parte del tiempo con la disponibilidad de la radiación solar (Osman and Abdalla, 2016). Algunas de las ventajas al implementar energía solar en distritos de enfriamiento son incrementar la eficiencia energética global en el enfriamiento de los edificios y disminuir las emisiones de CO₂. No obstante, como desventaja se tiene el alto espacio requerido para la instalación de los sistemas de energía solar, la alta inversión inicial y la necesidad de implementar tanques de almacenamiento de agua con el objetivo de ser usados cuando la irradiancia solar sea baja (Huang and Zheng, 2018).

Existen dos métodos para usar la energía solar en aplicaciones de enfriamiento, la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica. En sistemas de refrigeración, la tecnológica solar fotovoltaica se implementa para suministrar energía eléctrica a los chillers, pudiendo llegar a obtener eficiencias del 15%, en cambio que la tecnología con energía solar térmica se implementa con chillers de absorción y colectores solares, ya sean de superficie plana, superficies parabólicas o de tubos de vacío,

llegando obtener eficiencias por arriba del 40% (Vourdoubas, 2019; Ayou and Coronas, 2020).

El objetivo de la presente investigación es analizar la viabilidad económica de las diferentes tecnologías de paneles solares fotovoltaicos en aplicaciones de enfriamiento en diferentes ciudades de Colombia, determinando el porcentaje óptimo de ahorro de energía que se puede obtener. Este análisis resulta importante dado que para determinar la viabilidad de la energía solar no solo son importante los datos del recurso solar disponible, sino también la curva de demanda de enfriamiento de cada ciudad en específico, pues esta curva determina la cantidad de energía solar que puede ser aprovechada directamente cuando no se utilizan sistemas de almacenamientos de energía o cuando no se puede exportar el exceso de energía a la red eléctrica. Para este análisis se desarrolla un algoritmo en Python que permite evaluar los diferentes perfiles de demandas en cada ciudad y determinar la cantidad optima de energía solar que debe utilizarse para incrementar la rentabilidad de la inversión.

1. METODOLOGIA

Para la determinación de la viabilidad económica de la energía solar fotovoltaica en distritos de enfriamiento en Colombia, se analiza los

porcentajes de ahorro de energía y los retornos de la inversión en las diferentes regiones. Las zonas tenidas en cuenta para cada región se muestran en la tabla 1, con algunos indicadores preliminares como son el rango de número de horas solares pico, rango de temperaturas y la tarifa de electricidad correspondiente a estratos de nivel 4. Estos indicadores son importantes para conocer de antemano que tan viable podría llegar a ser dicha zona para la implementación de la energía solar, siendo la combinación de alta irradiación con baja temperatura la mejor para la tecnología

fotovoltaica. No obstante, aun cuando ciudades con la anterior combinación resulten beneficiadas con altos potenciales para el uso de la energía fotovoltaica, esto no indica que la rentabilidad del proyecto sea mejor, ya que otro factor a tener en cuenta es la demanda de enfriamiento en cada ciudad. Una ciudad con baja demanda de enfriamiento puede no resultar económicamente atractiva para la inversión de estos sistemas fotovoltaicos, pues los ahorros obtenidos son menores respecto a ciudades con alta demanda de enfriamiento.

Tabla 1. Ciudades consideradas para el análisis de la utilización de la energía solar.

Región	Ciudad	Horas de brillo solar	Temperatura (°C)	Tarifa electricidad (\$COP/ kWh)
Caribe	Barranquilla	6-7	24-33	558
	Santa Marta	6-7	22-35	558
	Valledupar	7-8	21-35	558
Andina	Manizales	4-5	9-25	560
	Cúcuta	4-5	21-33	560
	Ibagué	4-5	19-30	700
	Medellín	5-6	17-28	570
	Cali	4-6	19-31	570
	Bogotá	4-5	8-20	550
	Tunja	4-5	9-20	550
Pacífico	Quibdó	4-5	22-31	560
Orinoquia	Yopal	5-6	21-35	600
Amazonia	Mocoa	3-5	19-28	600
	Florencia	3-5	21-33	570
Insular	San Andres	6-7	25-31	470

Fuente: (Adam, 2018).

Para el análisis de la implementación de la energía solar se estudia el caso de un distrito térmico con chillers eléctricos condensados por aire y alimentados por paneles fotovoltaicos y energía de la red eléctrica. El distrito térmico a considerar tiene una capacidad de 2000 TR para un conjunto residencial, correspondiente a un aproximado de 500 apartamentos, ubicado a 1 kilómetro de distancia de la planta de enfriamiento.

Debido a que el análisis contempla las diferentes regiones de Colombia, para cada ciudad el perfil de demanda es calculado mediante el software CHVAC- Elite, y las condiciones de confort para cada ciudad se especifican de acuerdo con el estándar 55 de la ASHRAE "Condiciones de ambiente térmico para ocupación humana". Otras condiciones de diseño como el perfil ocupacional,

dimensiones y materiales de las edificaciones se mantienen iguales para todas las ciudades, solo variando las condiciones climáticas del exterior, las cuales fueron obtenidas de la base de datos de la Nasa (Adam, 2018).

Para comparar el efecto de la implementación de la energía solar fotovoltaica, para cada ciudad se dimensiona la planta de enfriamiento de referencia, donde los chillers son alimentados completamente por energía de la red. El dimensionamiento incluye la cantidad y capacidad de los chillers, así como también los gastos operaciones en el consumo de energía eléctrica. No se incluye otras variables como el dimensionamiento de las tuberías o bombas, dado que las anteriores variables no se ven afectadas, independientemente del uso o no uso de la energía solar.

El dimensionamiento del distrito, cálculo de la potencia fotovoltaica producida, determinación del número de paneles y área de terreno requerida son realizados mediante el algoritmo creado en Python. El análisis económico final se basó en variables económicas de evaluación de proyectos.

2. DIMENSIONAMIENTO DEL DISTRITO TÉRMICO

Una vez calculada la demanda de enfriamiento del distrito (variable para cada ciudad) con el software CHVAC- Elite, el algoritmo itera sobre una lista de chillers de velocidad variable y condensación de refrigerante por aire, cada uno con eficiencias (kW/TR) y capacidades (TR) diferentes, desde 100 TR hasta 550 TR. La elección del uso de chillers condensados por aire con respecto a condensados por agua es para reducir el impacto ambiental derivado por el consumo de agua por evaporación en las torres de enfriamiento. Las eficiencias especificadas por el fabricante de estos chillers condensados por aire están dadas para una temperatura de entrada y salida del agua del evaporador de 12°C y 7°C respectivamente, y con una temperatura de condensación de 35°C. Para la lista de chillers disponibles, estas eficiencias, a carga total, varían entre 1.08 – 1.36 kW/TR.

El algoritmo modifica la eficiencia del compresor dependiendo de la temperatura de bulbo seco exterior, ya que en el caso específico de los chillers enfriados por aire, existe aproximadamente una disminución del trabajo del compresor del 2 % por cada grado (°C) a la que se encuentre la temperatura de bulbo seco por debajo de la temperatura de diseño del fabricante (35°C). Del mismo modo, el trabajo del compresor aumenta aproximadamente en un 2% por cada grado (°C) que disminuya la temperatura de salida del agua del evaporador (Carrier, 2005; Peterson, 2017). Para el distrito térmico propuesto, se establece una temperatura de suministro de agua enfriada de 5°C, con una temperatura de retorno de máximo 12°C. Para el cálculo del número de chillers necesarios durante cada hora ($u_{(t)}$) se utiliza la ecuación 1.

$$u_{(t)} = \frac{Q_{(t)}}{C_{c,unidad}} \quad [1]$$

Donde $Q_{(t)}$ es la demanda de enfriamiento en cada hora y $C_{c,unidad}$ es la capacidad del chiller. Una vez determinada la cantidad de chillers, se utilizan las eficiencias corregidas para calcular el consumo eléctrico por hora. Estos consumos eléctricos establecen una curva de demanda eléctrica, como las mostrada en la figura 1, las cuales son necesarias para el dimensionamiento de los paneles solares.

3. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON PANELES FOTOVOLTAICOS

Se implementa paneles fotovoltaicos de diferentes tecnologías, especificadas en la tabla 2, que suministran energía a los chillers eléctricos. El cálculo de la potencia eléctrica que puede ser extraída de los paneles durante cada hora del día es realizada mediante la librería "Pvlib" de Python. Esta librería implementa el modelo de un diodo al igual que muchos de los softwares comerciales para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos. Al utilizar el modelo de un diodo, el algoritmo requiere como entrada la temperatura ambiente y la

irradiancia global horizontal (GHI) para cada hora del día durante cada mes, además de ciertos parámetros especificados por el fabricante de cada panel solar. Los paneles utilizados y los parámetros requeridos de cada uno fueron obtenidos de la base de datos del software PVsyst. Como salida, el modelo de un diodo determina la potencia (P) por hora, con la cual puede ser calculada la eficiencia del panel con la ecuación 2.

$$\eta = \frac{P}{G * A} \quad [2]$$

Donde G es la irradiancia solar recibida por el panel y A es el área del panel.

Tabla 2. Tecnologías de paneles solares fotovoltaicos analizadas.

Tecnología de panel	Potencia máxima (W)	Eficiencia máxima (%)	Área del panel (m ²)	Año del Modelo	Precio (\$USD/W)
Monocrystalino	585	21.40	2.73	2021	0.26
Policristalino	430	19.46	2.21	2020	0.24
HIT	450	21.30	2.20	2020	0.28
CIGS	360	15.37	2.35	2018	0.21

Fuente:(Fu et al., 2018)

El algoritmo creado en Python determina la cantidad de paneles necesarios ajustados a la curva de demanda, de tal forma que no se presente un excedente de energía durante alguna hora que conlleve a desperdicios de energía. La figura 1 muestra un ejemplo en un caso donde existe un excedente de energía entre las 7am y 12pm de un mes en específico en la ciudad de Quibdó, y dado que se considera que el sistema fotovoltaico no está conectado a la red u a otro dispositivo eléctrico diferente de los chillers, y tampoco se consideran sistemas de almacenamiento, la energía excedente no se puede exportar o almacenar y se perdería.

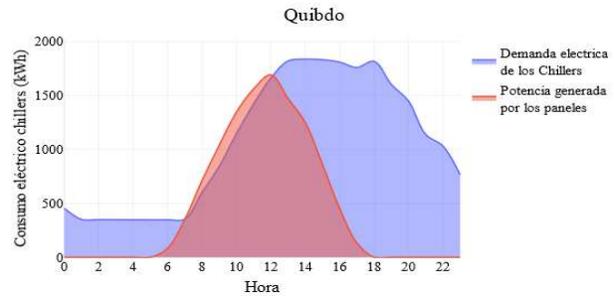


Figura 1. Caso ejemplo con exceso de energía eléctrica en la ciudad de Quibdó.

Los precios utilizados para analizar la rentabilidad de la inversión de los paneles fotovoltaicos se detallan en la tabla 3. El costo relacionado al m² del terreno y de su preparación varía dependiendo de la ciudad.

Tabla 3. Precios asociados al sistema de generación solar fotovoltaico.

Concepto	Precio (\$)	Unidades
Precio inversor-cargador y cableado	300	USD / kW
Precio instalación y estructura de paneles	3	USD/kW
O&M sistema fotovoltaico	22	USD / kW-año
Otros*	250	USD / kW

Fuente: (Fu et al., 2018)

*Incluye gastos relacionados con los accesorios de protección eléctricos, dispositivos de monitoreo, gastos administrativos y gastos relacionados con el diseño de ingeniería de detalle.

Se considera que el inversor tiene una eficiencia del 97%. Para el análisis económico, el retorno de la inversión y el TIR es calculado con base en los ahorros producidos al generar la electricidad que alimenta los chillers, contra la inversión que se quiere para implementar el sistema solar. Se considera además un incremento en los precios de la energía y del O&M ajustados a la inflación en Colombia para los próximos años. Para este análisis se consideró un incremento anual del 2.5%. Además, se tiene en cuenta una degradación anual de la potencia de salida del panel del 0.6%. Se utiliza una tasa de descuento del 8% para determinar el valor presente de los ahorros futuros.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Del análisis económico para cada ciudad se pudo identificar el flujo de caja para determinar los ahorros económicos, como se puede observar en la tabla 4 para la ciudad de Tunja usando paneles mono cristalinos. Se observa que existiendo un

incremento en la tarifa de electricidad estimado de 2.5 % anual, el ahorro económico (en miles de dólares) aumenta cada año aun cuando el costo de mantenimiento aumenta y la potencia fotovoltaica disminuye debido a la degradación, lo que reduce a su vez el ahorro de energía. También se especifica el ahorro económico actualizado al valor presente con la tasa de descuento.

Tabla 4. Factores relevantes del proyecto fotovoltaico.

Año	Tarifa electricidad (\$USD/kWh)	Potencia anual generada (MW)	Precio mantenimiento (\$USDx1000)	Ahorro de energía (%)	Ahorro económico (\$USDx1000)	Ahorro económico actualizado (\$USD x 1000)
1	0.16	17.6	7.7	19.3	77.5	71.8
2	0.17	17.5	7.9	19.2	78.9	67.6
3	0.18	17.4	8.1	19.1	80.3	63.8
4	0.18	17.3	8.3	19.0	81.8	60.1
5	0.19	17.2	8.5	18.8	83.3	56.7
6	0.20	17.1	8.7	18.7	84.8	53.4
7	0.21	17.0	8.9	18.6	86.3	50.4
8	0.22	16.9	9.1	18.5	87.8	47.5
9	0.22	16.8	9.4	18.4	89.4	44.7
10	0.23	16.7	9.6	18.3	91.0	42.2
11	0.24	16.6	9.8	18.2	92.6	39.7
12	0.25	16.5	10.1	18.0	94.3	37.4
13	0.26	16.3	10.3	17.9	95.9	35.3
14	0.27	16.2	10.6	17.8	97.6	33.2
15	0.28	16.1	10.8	17.7	99.3	31.3
16	0.29	16.0	11.1	17.6	101.1	29.5
17	0.31	15.9	11.4	17.5	102.8	27.8
18	0.32	15.8	11.7	17.3	104.6	26.2
19	0.33	15.7	12.0	17.2	106.4	24.7
20	0.34	15.6	12.3	17.1	108.3	23.2

Fuente: los autores.

Los porcentajes de ahorro de energía mostrados en la tabla 4 son los máximos por año cuando no existe un excedente de energía que se desperdicie como en el ejemplo mostrado en la figura 1. Los resultados mostraron que desde el momento donde exista un excedente de energía, el TIR empieza a disminuir, aun cuando el porcentaje de ahorro de energía aumente. Estos ahorros de energía podrían incrementarse siempre y cuando se utilicen sistemas de almacenamiento, ya sea baterías para almacenar la energía eléctrica excedente o utilizando tanques de almacenamientos de agua

fría, de tal forma que el exceso de energía eléctrica alimente a un conjunto de chillers que almacenen agua fría en el tanque para luego descargarla en los periodos de alta demanda de enfriamiento.

Los resultados de todas las ciudades analizadas se muestran desde la tabla 5 a la tabla 8 para las diferentes tecnológicas de paneles evaluadas en el análisis sensibilidad. Cada tabla especifica el número de paneles necesarios, redondeados a la centena más cercana, el payback descontado para recuperar la inversión, el retorno a la inversión

(TIR), el ahorro de energía alcanzado durante los 20 años del proyecto y la potencia anual generada durante el primer año del proyecto

Tabla 5. Indicadores económicos y energéticos para cada ciudad utilizando paneles mono cristalinos (580 W).

Región	Ciudad	Número de paneles monocristalinos	Payback (años)	TIR (%)	Ahorro de energía (%)	Potencia anual generada (MW)
Caribe	Barranquilla	2800	6.1	19.6	36.9	95.5
	Santa Marta	2800	6.1	19.6	39.8	95.5
	Valledupar	1800	7.1	18.3	28.7	57.6
Andina	Manizales	800	8.0	17.2	20.3	24.2
	Cúcuta	3800	9.0	14.9	41.5	102.2
	Ibagué	1800	6.1	20.2	26.4	50.2
	Medellín	1000	7.1	18.0	22.8	30.9
	Cali	3000	9.0	15.1	43.7	80.0
	Bogotá	800	8.1	16.1	18.2	23.4
	Tunja	600	8.1	16.2	24.4	83.0
Pacífico	Quibdó	3400	11.0	13.1	37.0	83.0
Orinoquia	Yopal	3400	9.1	14.4	37.0	24.1
Amazonia	Mocoa	1000	10.0	14.1	16.9	42.4
	Florencia	1600	9.0	15.0	21.0	107.6
Insular	San Andres	3400	9.1	14.6	43.5	17.6

Fuente: los autores.

Tabla 6. Indicadores económicos y energéticos para cada ciudad utilizando paneles policristalinos (430W).

Región	Ciudad	Número de paneles policristalinos	Payback (años)	TIR (%)	Ahorro de energía (%)	Potencia anual generada (MW)
Caribe	Barranquilla	3600	6.0	21.5	37.3	96.7
	Santa Marta	3600	6.0	21.5	40.3	96.7
	Valledupar	2400	6.1	20.1	30.1	60.6
Andina	Manizales	1000	7.0	19.1	20.1	24.0
	Cúcuta	5000	8.0	16.4	42.9	105.9
	Ibagué	2200	5.1	22.2	25.5	48.5
	Medellín	1200	6.1	19.9	21.7	29.4
	Cali	3600	8.0	16.8	41.7	76.2
	Bogotá	1200	7.1	17.9	21.6	27.8
	Tunja	800	7.1	18.1	25.9	84.8
Pacífico	Quibdó	4400	9.1	14.6	37.8	84.8
Orinoquia	Yopal	4400	8.1	15.9	37.9	26.8
Amazonia	Mocoa	1400	8.1	15.8	18.8	41.9
	Florencia	2000	8.0	16.6	20.8	109.9
Insular	San Andres	4400	8.1	16.2	44.4	18.7

Fuente: los autores.

Tabla 7. Indicadores económicos y energéticos para cada ciudad utilizando paneles HIT (450W).

Región	Ciudad	Número de paneles HIT	Payback (años)	TIR (%)	Ahorro de energía (%)	Potencia anual generada (MW)
Caribe	Barranquilla	3400	6.0	21.2	37.4	96.8
	Santa Marta	3400	6.0	21.2	40.4	96.8
	Valledupar	2200	6.1	19.7	29.2	58.7
Andina	Manizales	1000	7.0	18.6	21.1	25.3
	Cúcuta	4600	8.1	16.1	41.7	102.9
	Ibagué	2200	6.0	21.7	26.8	51.1
	Medellín	1200	6.1	19.5	22.8	31.0
	Cali	3600	8.1	16.4	43.7	80.0
	Bogotá	1000	7.1	17.5	19.0	24.4
	Tunja	800	7.1	17.6	27.1	81.1
Pacífico	Quibdó	4000	10.0	14.3	36.2	81.1
Orinoquia	Yopal	4000	9.0	15.6	36.2	24.1
Amazonia	Mocoa	1200	9.0	15.4	16.9	44.1
	Florencia	2000	8.1	16.2	21.9	105.6
Insular	San Andres	4000	8.1	16.0	42.7	19.6

Fuente: los autores.

Tabla 8. Indicadores económicos y energéticos para cada ciudad utilizando paneles CIGS (360 W).

Región	Ciudad	Número de paneles CIGS	Payback (años)	TIR (%)	Ahorro de energía (%)	Potencia anual generada (MW)
Caribe	Barranquilla	7200	12.0	12.2	38.5	99.6
	Santa Marta	7200	12.0	12.2	41.6	99.6
	Valledupar	4400	13.0	11.2	28.7	59.0
Andina	Manizales	2000	14.0	10.8	21.2	26.6
	Cúcuta	7800	18.0	8.7	35.1	93.2
	Ibagué	4200	11.0	13.0	25.6	48.6
	Medellín	2400	13.0	11.3	22.8	31.0
	Cali	7000	17.0	9.1	43.0	77.6
	Bogotá	2400	15.0	9.9	22.8	29.3
	Tunja	1800	15.0	10.1	30.8	82.6
Pacífico	Quibdó	7800	19.0	8.2	35.5	82.1
Orinoquia	Yopal	7800	18.0	8.4	18.0	27.6
Amazonia	Mocoa	2600	18.0	8.4	18.0	43.1
	Florencia	4000	17.0	8.9	17.0	109.1
Insular	San Andres	7800	18.0	8.4	18.0	22.3

Fuente: los autores.

En la figura 2 se ilustra la energía aportada por los paneles según el perfil de demanda en algunas de las ciudades analizadas, donde la curva azul indica el consumo de electricidad por parte de los chillers mientras que la curva roja indica la energía ahorrada mediante el sistema solar. Nuevamente, es importante anotar que los ahorros determinados

son los óptimos para maximizar el TIR, ya que, si bien se puede incrementar los ahorros de energía al aumentar la cantidad de paneles, esto no solo conlleva a aumentar la inversión inicial, sino que además conlleva a tener excedentes de energía en ciertas horas del día. Esto resulta en el uso no eficiente de la energía generada por paneles

adicionales instalados. Para poder aumentar el ahorro de energía haciendo uso eficiente de la

misma, se requeriría de sistemas de almacenamiento de energía.

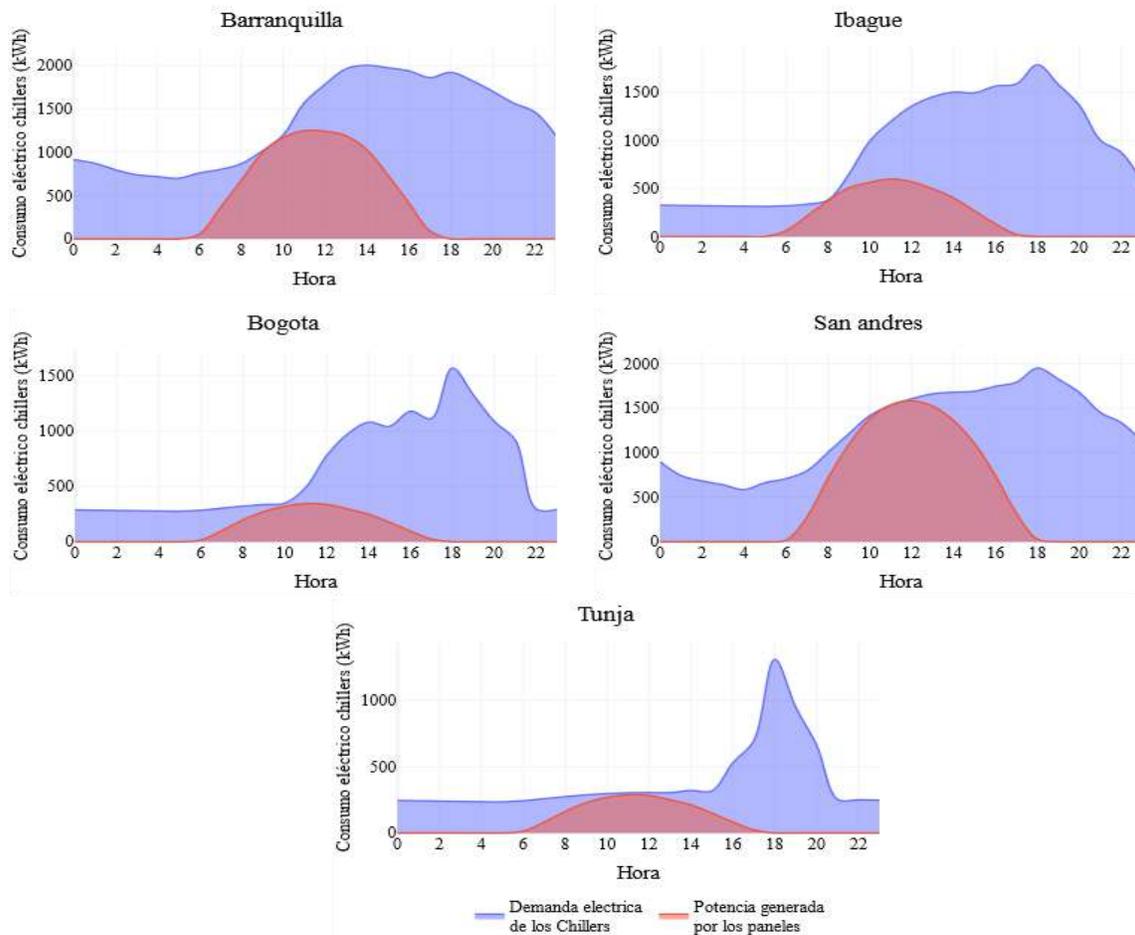


Figura 2. Perfiles de demanda con el ahorro de energía eléctrica mediante los sistemas fotovoltaicos.

Fuente: Los autores

De los resultados se observa que la cantidad de paneles, ahorro de energía y TIR no solo dependen de las condiciones climáticas del lugar, ya que, por ejemplo, San Andrés requiere de más paneles solares que Barranquilla, y tiene menor TIR aun con condiciones similares. Esto puede deberse principalmente a que San Andrés requiere de mayor inversión inicial, además de que el ahorro económico es menor debido a que su tarifa eléctrica es menor con respecto a la de Barranquilla. De la figura 2 se observa que San Andrés puede disponer de más paneles debido a que su curva de demanda lo permite, por ejemplo, específica a las 10am la demanda de San Andrés es alrededor de 1500 kWh,

mientras que la de barranquilla es alrededor de 1200 kWh. En este punto, la tarifa eléctrica resulta fundamental para evaluar la viabilidad del proyecto, tal como en el caso de Ibagué, donde resulta tener la mayor TIR debido a que tiene la mayor tarifa eléctrica.

Del análisis de sensibilidad de las tecnologías se observó que los mayores retornos de la inversión se obtienen al utilizar el panel policristalino debido a su precio inferior con respecto al HIT y al monocristalino los cuales tienen una mayor eficiencia. El panel CIGS resulta ser el menos viable debido a su baja eficiencia.

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta la energía necesaria para cubrir la demanda de un distrito térmico promedio de 2000 TR para el sector residencial, se determinó la cantidad de paneles necesarios para las diferentes tecnologías empleadas de tal forma que se maximice el retorno de la inversión y el ahorro de energía. El porcentaje de ahorro de energía que se logra depende principalmente del perfil de demanda de enfriamiento, de las condiciones climáticas del exterior (irradiancia, brillo solar y temperatura), de la tarifa de electricidad y de la eficiencia de la tecnología fotovoltaica utilizada. El perfil de demanda resulta importante ya que este es el que limita la cantidad de energía eléctrica fotovoltaica que se puede producir a lo largo del día si el sistema no se encuentra conectado a la red o no se dispone de un sistema de almacenamiento de energía. En estos casos, resulta importante optimizar el dimensionamiento del sistema solar, de tal forma que no existan excedentes de energía, lo que conllevaría a obtener rentabilidades menores y paybacks mayores. Adicionalmente se consideró necesario el uso de tanques de almacenamiento de energía, pues si bien aumenta el CAPEX del proyecto, lo que permitiría mayores ahorros de energía al aumentar la capacidad instalada en paneles o la venta de los excedentes de energía a la red.

Se determinaron los ahorros de energía, rentabilidad y retornos de la inversión para las principales ciudades de cada región. El rango de ahorros de energía eléctrica por la implementación de los sistemas fotovoltaicos varía según la tecnología de los paneles, desde un 19% hasta un 47%, las tasas internas de retorno van desde un 9.3 % hasta un 21.5%, y los periodos de retorno de la inversión van desde 6 años hasta 11 años. La tecnología que presenta los mejores niveles de ahorro, rentabilidad y retorno de la inversión de manera general en el territorio colombiano son los paneles policristalinos, requiriendo menos de una hectárea para su instalación. Teniendo la mayor

tasa interna de retorno, el menor número de paneles y el mayor porcentaje de ahorro de energía, se puede categorizar las siguientes ciudades con mayor potencial para este tipo de proyecto: 1) Ibagué, 2) Barranquilla y Santa Marta, 3) Valledupar, 4) Medellín, 5) Manizales, 6) Tunja, 7) Bogotá, 8) Cali, 9) Florencia, 10) Cúcuta, 11) San Andres, 12) Yopal, 13) Mocoa y 14) Quibdó.

La implementación y uso de la energía renovable fotovoltaica en los proyectos de distrito térmicos de enfriamiento, facilita la migración a las tecnologías verdes y a la buena gestión energética en cumplimiento de los compromisos medioambientales.

Para futuras investigaciones se evaluará la posibilidad de implementar la energía solar térmica en sistemas de enfriamiento teniendo en cuenta su potencial uso en el territorio colombiano y sus niveles superiores de eficiencia energética.

REFERENCIAS

- Adam, Sparks.,2018. "Nasapower: A NASA POWER Global Meteorology, Surface Solar Energy and Climatology Data Client for R." *The Journal of Open Source Software* 3(30). doi: 10.21105/joss.01035.
- Ayou, Dereje S., and Alberto Coronas.,2020. *New Developments and Progress in Absorption Chillers for Solar Cooling Applications*. Vol. 10.
- Carrier.,2005. *Commercial HVAC Air-Cooled Chillers*. Nueva York.
- Fu, Ran, David Feldman, and Robert Margolis.,2018. "U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018." *Nrel (Novmber)*:1-47.
- Huang, Li, and Rongyue Zheng.,2018. "Energy and Economic Performance of Solar Cooling Systems in the Hot-Summer and Cold-Winter Zone." *Buildings* 8(3). doi: 10.3390/buildings8030037.
- Osman, E. A., and K. N. Abdalla.,2016. "Design and Construction of an Absorption Cooling System Driven by Solar Energy." (June):10.
- Peterson, Kent W.,2017. "Avoiding Stratified Chilled Water TES Problems." *ASHRAE Journal* 59(11):66-69.
- Vourdoubas, John.,2019. "Possibilities of Using Solar Energy in District Cooling Systems in the Mediterranean Region." *Open Journal of Energy Efficiency* 08(02):21-34. doi: 10.4236/ojee.2019.82002

Distritos térmicos: un motor para el desarrollo y fortalecimiento de la calidad de vida en ciudades sostenibles

Yohana Alzamora Armella¹; Marco Aurelio Polo Llanos²

¹yalzamora@serviparamo.com.co; ²mpolo@serviparamo.com.co

RESUMEN

A lo largo de la historia el desarrollo de los distritos de energía y/o distritos térmicos ha estado asociado a la búsqueda de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles en las zonas donde se desarrollan y a obtener beneficios en términos de uso eficiente de la energía, disminución de la huella de carbono y reducción de los impactos ambientales asociados al uso de fuentes energéticas no renovables.

Los beneficios tanto técnicos como económicos de los distritos térmicos ya han sido ampliamente discutidos y comprobados en la práctica, apartando un poco del análisis los impactos potenciales que este tipo de desarrollos generan en los indicadores de calidad de vida de los habitantes / usuarios de sus zonas de influencia. Es por esto que nuestra investigación se enfoca en evidenciar, con datos sustentables, el potencial que tiene el desarrollo de este tipo de proyectos para jalonar la transformación positiva de indicadores claves asociados a ciudades sostenibles con alto potencial de desarrollo, como lo son: la productividad, mejoramiento de los ranking educativos, calificación de ambientes laborales, entre otros, que se relacionan e impactan directamente en la calidad de vida de las personas, el cual es un concepto que debe estar necesariamente asociado a los planes de transformación de nuestras ciudades a modelos sostenibles.

En resumen, este ejercicio académico busca concluir como los distritos térmicos permiten masificar y facilitar el acceso a una porción mayor de la población, a condiciones climáticas de confort que les permitan desarrollar sus habilidades en los diferentes ámbitos de su desarrollo individual.

ABSTRACT

Throughout history the development of energy districts and / or thermal districts has been associated with the search for a better use of the energy resources available in the areas where they are developed and obtaining benefits in terms of efficient energy use. , reduction of the carbon footprint and reduction of environmental impacts associated with the use of non-renewable energy sources.

¹ Serviparamo S.A.S., Gerente General; Barranquilla; Colombia. yalzamora@serviparamo.com.co

² Serviparamo S.A.S., Gerente Comercial, Barranquilla, Colombia mpolo@serviparamo.com.co

The technical and economic benefits of thermal districts have already been widely discussed and proven in practice, taking away from the analysis the potential impacts that these types of developments generate on the quality of life indicators of the inhabitants / users of their areas. of influence. That is why our research focuses on showing, with sustainable data, the potential that the development of this type of projects has to mark the positive transformation of key indicators associated with sustainable cities with high development potential, such as: productivity , improvement of educational rankings, qualification of work environments, among others, that are related and have a direct impact on the quality of life of people, which is a concept that must necessarily be associated with the transformation plans of our cities to models sustainable.

In summary, with this academic exercise we seek to conclude how the thermal districts allow to massify and facilitate access to a greater portion of the population, to comfortable climatic conditions that allow them to develop their skills in the different areas of their individual development

Palabras Clave: Calidad, Sostenible, Ciudades, Distrito

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de distritos térmicos y de energía en el mundo tiene una larga historia y muchos antecedentes que seremontan a una poco mas de cien años en los países desarrollados, donde el aprovechamiento de estos modelos de producción sinérgica de energías para distintos usos, ha sido ampliamente aprovechado, en un principio para dar solución a las necesidades energéticas básicas de los centros urbanos, hasta la evolución y el desarrollo actual de estos centros de producción como una de las respuestas a la imperativa necesidad de cambio de los modelos de producción de energías tradicionales que se basan principalmente en el uso de combustibles fósiles. En Colombia y en Latinoamérica en general, la adopción de estos modelos de producción energética apenas despunta sus primeros casos de aplicación en las recientes dos décadas.

Reducir la huella de carbono, disminuir el avance del calentamiento climático y en general reducir el impacto que suponen las actividades humanas, en especial en las ciudades que es donde se concentra gran parte de la población global, es la punta de lanza de implementar modelos de desarrollo sostenible. Sin embargo, se considera de gran importancia resaltar e identificar la naturaleza de otros impactos positivos de la implementación de los distritos y que además de los aspectos

ambientales son de obligatoria consideración para enmarcar una ciudad en el concepto de sostenibilidad.

Teniendo en cuenta lo anterior el objetivo del desarrollo de este ejercicio escrito, es ampliar la visión del impacto positivo de los distritos de energía, cuyo alcance va más allá de sus comprobados beneficios en términos de eficiencia y como aportan a la disminución de un concepto específico de pobreza no muchas veces abordado como es la pobreza energética de los habitantes de nuestras ciudades.

1. POBREZA ENERGÉTICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Antes de profundizar en la naturaleza propia del presente ejercicio, es importante contextualizar en estos dos conceptos y su relación, en especial con el fin de acercar este análisis a la realidad de los países de nuestra región, donde todavía existe mucho trabajo por hacer en términos de cobertura y cubrimiento de las necesidades energéticas de las poblaciones, solo así se podrá extender el entendimiento de los distritos como motores de desarrollo que no solo aplican para la optimización del uso de los recursos energéticos, sino que también facilitan el acceso a estos de una mayor parte la población.

1.1. Qué es la pobreza energética?

La pobreza energética se define como la dificultad de un hogar para satisfacer sus necesidades básicas de energía y se traduce en impactos negativos sobre el bienestar de las personas que allí conviven, tales como la falta de **confort térmico**, riesgos de salud, limitaciones para el desarrollo, reducción de la renta disponible para otros bienes y servicios, malas condiciones de habitabilidad, riesgo de no pago y suspensión del servicio. Es a su vez un concepto muy ligado a la desigualdad energética que básicamente se relaciona con el acceso permanente a energía limpia y de calidad por parte de una pequeña parte de la población.

Si bien la pobreza energética es un fenómeno diferente al concepto más amplio de pobreza o exclusión social, puesto que un hogar puede encontrarse en una situación de pobreza energética sin estar necesariamente inmerso en una condición de pobreza monetaria, son dos conceptos muy ligados ya que a mayor nivel de pobreza energética es menos probable que los hogares logren mayores niveles de desarrollo económico que les permitan reducir la vulnerabilidad de entrar en una condición de pobreza monetaria.

Uno de los factores que más se ven afectados o que más se sacrifican cuando un hogar se encuentra en condición de pobreza energética, dada las deficientes condiciones de acceso a la energía o los altos costos que esta representa en los gastos del hogar, es el confort térmico de las viviendas. Respecto a este punto se ha documentado ampliamente la importancia de mantener una temperatura mínima y máxima saludable al interior de las viviendas, la cual debería oscilar entre los 18°C y 24°C (ASHRAE, 2010). La exposición prolongada a temperaturas más bajas se vincula a un mayor riesgo de sufrir enfermedades respiratorias y cardíacas, que también son frecuentemente asociadas a la exposición a altas temperaturas.

En la publicación Desarrollo de Indicadores de Pobreza Energética en América Latina y el Caribe de la CEPAL, se muestra otra dimensión de los impactos de esta condición: *“Adicionalmente, a sus efectos sobre la salud, la pobreza energética también presenta un vínculo importante con el acceso a oportunidades de empleo y educación, ya que la existencia de un servicio energético de mala calidad, con baja capacidad, estabilidad y seguridad, limita la conexión y el acceso a la información de quienes habitan la vivienda (Altomonte et al., 2020). El acceso a la electricidad, Tecnologías de Información y Comunicación y ambientes libres de contaminación atmosférica se asocian a efectos positivos en las oportunidades laborales y educativas de los miembros del hogar (Bridge et al., 2016; Day et al., 2016; González-Eguino, 2015; Lu, 2020; Pueyo & Maestre, 2019). Un ejemplo de esto es el aumento de la empleabilidad de mujeres en sectores rurales de Sudáfrica una vez que acceden a la electrificación de las viviendas, lo que se explicaría por la disminución del tiempo dedicado en tareas domésticas y la mayor disponibilidad para entrar en el mundo laboral remunerado (Pueyo & Maestre, 2019)”. De esta misma forma se puede encontrar la relación existente entre una deficiente climatización en escuelas, centros de estudios y lugares de trabajo asociada a una baja productividad y a una menor oportunidad de desarrollar habilidades y competencias que permitan jalonar el desarrollo social y económico de las comunidades. Muestra de estos impactos son los antecedentes de resultados arrojados en las pruebas nacionales Saber 11 realizadas anualmente por el Instituto Colombiano de Fomento de la Educación (ICFES), (Figura 1) en los que se evidencia como los 10 departamentos con promedio más bajo, corresponden a zonas del país donde el acceso a la energía no está garantizado al 100% de su población y a su vez son regiones donde las condiciones climáticas son un factor que requiere ser manejado a fin de garantizar ambientes adecuados para el desarrollo de las actividades de aprendizaje*

eléctrica y térmica especialmente, a una mayor porción de la población.

Si bien los gobiernos están en la obligación de garantizar el acceso a la energía a todos los habitantes del país, la implementación de modelos a menor escala, sectorizados al interior de los centros urbanos y que estén diseñados con base en un concepto de sinergia de energías y en los cuales participen, además del sector público, el sector privado, organizaciones y gremios empresariales, surge como una alternativa que permite reducir costos de energía y facilitar su acceso a una mayor población garantizando confiabilidad en el suministro y bajos costos, además de permitir contar con energías térmicas para acondicionamiento de espacios como un servicio que reduce los altos costos de inversión en equipos y operación de estos sistemas. En este sentido **los Distritos Térmicos y de Energía** surgen como un motor que jalona el desarrollo sostenible y permite

avanzar en vencer la pobreza energética y sus efectos ya mencionados

2. DISTRITOS TÉRMICOS MAS ALLA DE LOS INDICADORES DE EFICIENCIA Y BAJO IMPACTO AMBIENTAL

En los apartes anteriores de este documento se ha procurado contextualizar y establecer que no es posible hablar de desarrollo sostenible en nuestras ciudades, país y región en general, sin abordar las deficiencias de cobertura primaria que impactan directamente en las condiciones de vida de las comunidades y en su desarrollo. En Latinoamérica el camino a la sostenibilidad no debe tener su visión enfocada solamente en la mejora de indicadores ambientales o la descarbonización de sus emisiones ya que esta es una de las zonas del planeta con menores tasas de generación de CO₂ per cápita (Figura 2)

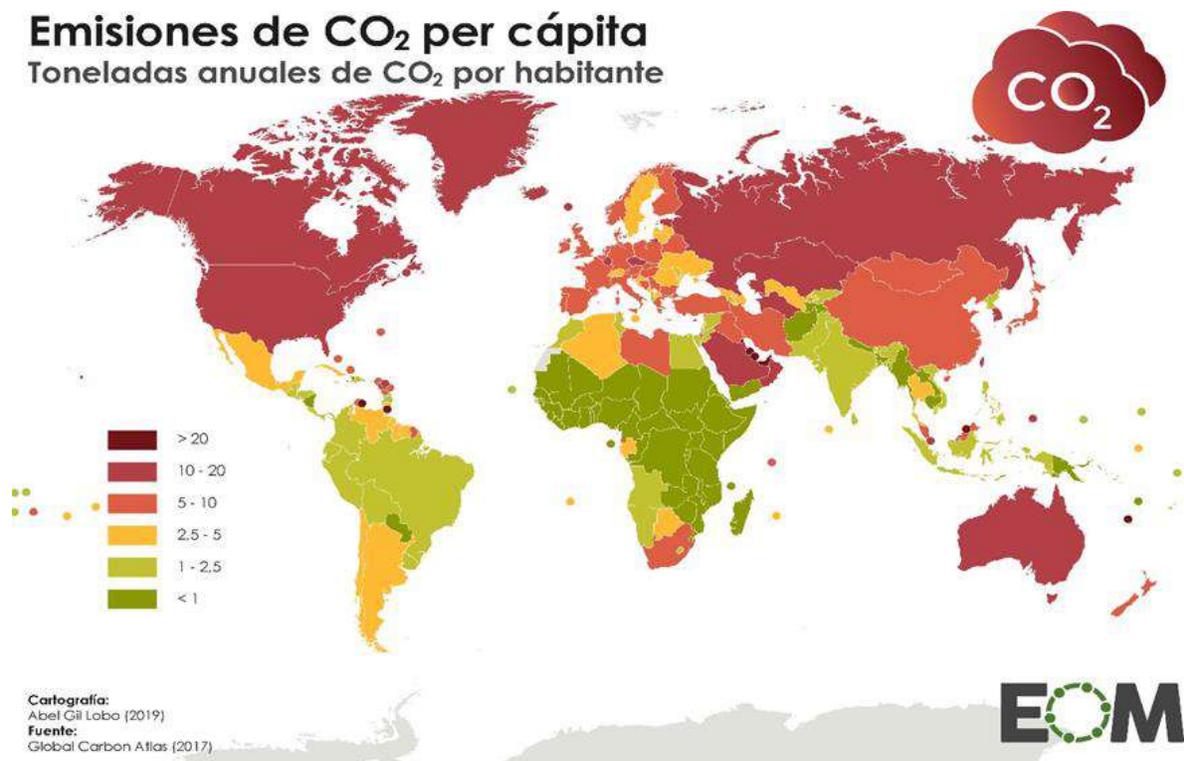


Figura 2. Emisiones anuales de CO₂ per cápita
Fuente: Global Carbon Atlas

Lo anterior no significa dejar de lado los aspectos ambientales, todo lo contrario, es integrar todos estos aspectos dentro de las estrategias a desarrollar y entender que dependiendo de la región se deben ajustar los modelos que han tenido éxito en países desarrollados, fortaleciéndolos en el abordaje de factores propios de nuestras latitudes

2.1. Distritos Térmicos y de Energía: otra visión

Sin perder de vista los enormes y comprobados beneficios que en la práctica tiene la implementación de modelos de centralización y producción sinérgica de energías en aspectos ambientales, financieros y operativos, los distritos térmicos tienen todo el potencial para convertirse en una más de las herramientas que tienen los gobiernos nacional y local para avanzar en brindar más y mejor energía a sus comunidades, con el componente adicional de que es un modelo en el que la participación de importantes actores de la economía como el sector privado es perfectamente viable y necesario. A continuación, se enuncian algunas de las características que hacen a los distritos una alternativa viable para cerrar la brecha de desigualdad energética existente y aportar en la mejora de la calidad de vida de las comunidades:

- Permite el desarrollo de centrales de producción y transformación energética a menor escala que no necesariamente requieren la intervención o apalancamiento del estado. Su estructuración técnica y diseño se adapta a las condiciones de la zona donde se desarrolla, permitiendo el uso de los recursos o potencialidades que sean estratégicos para asegurar una operación y desarrollo más eficiente y de bajo costo.
- Por el hecho de ser proyectos de menor escala, su desarrollo se puede masificar en todas las regiones del país generando un impacto positivo en la generación de empleo y oportunidades de emprendimiento de alcance nacional y no focalizado como ocurre con los grandes proyectos de infraestructura eléctrica desarrollados por el estado.

- Brinda una nueva visión, manejo y alcance de las energías térmicas ya que permite el acceso a una mayor porción de la población bajo el modelo de servicio.
- Su desarrollo atrae inversión extranjera y aporta una nueva visión de negocios que abre un gran número de oportunidades de desarrollo para el país.

Si bien el país inició el desarrollo de distritos térmicos y de energía enfocado al uso institucional (Distrito Térmico La Alpujarra – Medellín) y comercial (Distrito Térmico Lo Nuestro – Montería), ya existen proyectos en operación que comercializan la energía térmica al sector residencial (Distrito Térmico Serena Del Mar – Cartagena), permitiendo el acceso a sus usuarios a una alternativa con menores costos de operación y una menor inversión inicial. Es precisamente este tipo de modelos los que se deben replicar y en los que el estado debe trabajar para apoyar con incentivos, no solo tributarios sino del tipo que hagan más atractivo a los actores involucrados en integrar en sus proyectos un componente que permita masificar este tipo de servicios

3. CONCLUSIONES

La experiencia en el desarrollo de distritos térmicos y de energías en distintas regiones y modalidades ha permitido entender su naturaleza, aprendiendo del éxito y entendiendo como su modelación puede ir más allá de una serie de beneficios financieros, ambientales y de eficiencia energética. Son más de cinco los proyectos desarrollados con éxito en el país y su desarrollo sigue adelante con paso firme y seguro, lo que sigue es capitalizar las buenas experiencias y potencializar este modelo de sinergias energéticas llevándolo al siguiente nivel, esto es explotando su faceta y potencialidad de permitir el acceso a mejores condiciones y más alternativas energéticas a una mayor parte de la población.

Esta evolución debe darse con el concurso de los entes gubernamentales, los gremios, ONG nacionales y extranjeras, sector privado y la

academia, entendiendo que de esta unión deben surgir acuerdos y modelos de colaboración prácticos que tengan como visión generar soluciones a problemas de acceso a la energía, que además de brindar una solución técnica y financiera

efectiva en particular, tenga un impacto positivo en aportar al desarrollo sostenible de las ciudades con una mirada hacia la mejora de la calidad de vida de sus habitantes