

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ENERGÍA DE EQUIPOS DE
ENFRIAMIENTO EVAPORATIVOS EN DIFERENTES CONDICIONES CLIMATICAS**



ROBERT ANDRÉS PAREJO TOVAR

IVAN DARIO CARDONA SANCHEZ

MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:

Ing. JESÚS DAVID RHENALS JULIO

CODIRECTOR

Ing. ANDRES FELIPE TAPIA VERTEL

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CÓRDOBA

2021

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecer a mi director Jesús David Rhenals Julio, quien nos apoyó y guio durante las etapas de elaboración de este proyecto para poder culminarlo.

También me gustaría agradecer al departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Córdoba por su enorme esfuerzo para hacer posible todo este proyecto, por su excelente cuerpo de docentes que nos ayudaron con sus conocimientos y opiniones en todo el curso del diplomado.

Por ultimo y no menos importante, agradezco a toda mi familia y mi novia por el apoyo desde el inicio de mi carrera hasta estos momentos finales, gracias por sus voces de alientos en momentos difíciles. En especial a mis padres que lucharon y pusieron muchos esfuerzos en mí, para que pudiera llegar a culminar mis sueños.

Iván Darío Cardona Sánchez

Agradezco a mis padres por ser la motivación y amor incansable que necesite día a día para culminar esta y otras metas en mi vida, gracias por depositar toda su confianza en mí y darme ese empujón que siempre necesite en momentos de incertidumbre para saber que todo estaba bien, a mis hermanos, he contado con ellos toda mi vida, gracias por sus deseos de que todo me salga bien. A ellos, mi familia, gracias por su condescendencia y por saber sobrellevar aquellas cosas que sólo una familia unida es capaz de superar. Los amo demasiado.

Robert Andrés Parejo Tovar

Contenido

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS.....	7
DESARROLLO DEL TEMA.....	8
1. Equipos evaporativos.....	8
1.1. Eficiencia energética en HVAC.....	8
2. Características de Montería.....	9
2.1. Condiciones climáticas	9
2.2. Consumo de energía.....	10
ESTADO DEL ARTE.....	11
METODOLOGÍA.....	13
3. Influencia de las condiciones climáticas.....	13
4. Condiciones experimentales	14
5. Modelo matemático.....	16
RESULTADOS	20
CONCLUSIONES	25
BIBLIOGRAFIA	26
ANEXOS.....	30

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Distribución de consumo por sectores y tipos de fuentes de energía, 2016 (Estrategia Energética Local de MONTERÍA, 2019).</i>	10
<i>Ilustración 2. Almohadilla tipo panal o Honeycomb (AviNew, 2021).</i>	15
<i>Ilustración 3. Almohadilla tipo Aspen o paja (VentDepot, 2021).</i>	16
<i>Ilustración 4. Proceso de evaporación directa psicométrico (Bishoyi & Sudhakar, 2017).</i>	17
<i>Ilustración 5. Variación de temperatura de bulbo seco (ambiente, almohadilla aspen y panal) (elaboración propia).</i>	22
<i>Ilustración 6. Variación de la Humedad relativa en el febrero (elaboración propia).</i>	22
<i>Ilustración 7. Eficacia de cada una de las almohadillas en los días (EES SOLVER).</i>	23
<i>Ilustración 8. Capacidad de enfriamiento de las almohadillas (EES SOLVER).</i>	23
<i>Ilustración 9. Capacidad de enfriamiento de las almohadillas (elaboración propia).</i>	24
<i>Ilustración 10. Relación de la eficiencia energética del equipo (EES SOLVER).</i>	24

LISTA DE TABLA

<i>Tabla 1. Temperatura y humedad relativa en Montería 2019 (Tú Tiempo Network, 2021)</i>	9
<i>Tabla 2 Datos climáticos de Montería en Febrero 2019 (TuTiempo Network, 2021).</i>	14
<i>Tabla 3. Grupo energético de los enfriadores(Bishoyi & Sudhakar, 2017).</i>	19
<i>Tabla 4. Resultados de rendimiento para la almohadilla tipo Aspen (Resultados EES).</i>	20
<i>Tabla 5. Resultados de rendimiento para la almohadilla tipo Panal (resultados EES).</i>	21
<i>Tabla 6. ACR por hora en diferentes ubicaciones(Bishoyi & Sudhakar, 2017).</i>	30
<i>Tabla 7. valores de Velocidad de flujo(V), Reynolds (Re), Nusset (Nu) y Coeficiente convectivo (h).</i>	31

RESUMEN

En la presente investigación se desarrolló un estudio de la afectación de las condiciones climáticas en el rendimiento de equipos evaporativos situados en la ciudad de Montería, utilizando el software EES en el cual se realizaron las diversas modelaciones de la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del aire. El desarrollo de esta estrategia inicia con la caracterización de equipos de enfriamiento evaporativo disponibles, como segunda instancia la identificación de las variables climáticas que influyen en el sistema, tercera sección es la selección de un equipo en base a las condiciones ambientales, cuarta sección es la realización de la simulación del equipo variando dichas condiciones y por último dar las conclusiones y recomendaciones para el sistema.

Palabras clave: Enfriamiento evaporativo, Condiciones ambientales, Software EES, Mejoras energéticas.

ABSTRACT

In this research, a study was developed of the effect of climatic conditions on the performance of evaporative equipment located in the city of Montería, using the EES software in which the various modeling of ambient temperature, relative humidity and air velocity were carried out. air. The development of this strategy begins with the characterization of available evaporative cooling equipment, as a second instance the identification of the climatic variables that influence the system, the third section is the selection of an equipment based on the environmental conditions, the fourth section is the Carrying out the simulation of the equipment varying these conditions and finally giving the conclusions and recommendations for the system.

Keywords: Evaporative cooling, Environmental conditions, EES software, Energy improvements.

INTRODUCCIÓN

El clima ha ido cambiando con el desarrollo de las tecnología dado que en un principio solo se implementaban el desarrollo tecnológico con aspectos innovadores y de soluciones de problemas, pero con el transcurso de los años se implementaron muchas tecnologías que incrementaban la producción de gases de CO₂, el cual realiza un daño a la capa de ozono de manera irreversible, a principio de la década de 1970 se empezó a desarrollar regulaciones ambientales que buscaban mitigar los daños al medio ambiente, por ello todos los países del mundo deben adoptar las medidas necesarias para reducir drásticamente las emisiones de gases productores del efecto invernadero (Roca Villanueva et al., 2019).

La investigación muestra que, en Europa, los edificios representan el 39% del consumo total de energía, de los cuales el 26% es para edificios residenciales y el 13% para arquitecturas comerciales. En China, entre el 25% y el 30% de la energía primaria nacional total es consumida por edificios civiles e industriales. Mientras que, en América, los edificios representan el 40% del consumo total de energía, de los cuales dos tercios son consumidos por edificios comerciales. (Ma & Guan, 2015)

Ante la temática de las condiciones climáticas que se han presentado en las últimas décadas se ha podido evidenciar que el cambio climático es un hecho real y no solamente una hipótesis. Dado así que el Grupo del Banco Mundial anunció que, durante los últimos cinco años, había entregado más de \$ 83 mil millones en financiamiento climático para ayudar a los países en desarrollo a invertir en oportunidades resilientes y con bajas emisiones de carbono (World Bank Group, 2016). Colombia es uno de los países que se ha visto afectado por estos fenómenos climáticos teniendo fuertes sequias e inundaciones que se presentan en gran parte del país, lo que genera afectaciones en sus fuentes de generación de energía, Por lo cual ante esta problemática es necesario analizar y estudiar opciones de eficiencia energéticas.

Los equipos de refrigeración son unos de los más usados en la industria y en hogares, por eso es de suma importancia intervenir en la eficiencia energética de estos dado que este factor se ve afectado por muchos aspectos entre ellos las condiciones climáticas que se pueden presentar en una región, por lo que en este documento se realizó un análisis el desempeño de

un equipo evaporativo en la ciudad de Montería, donde como primera sección se planteó la caracterización de los equipos evaporativos, en una segunda sección la identificación de los aspectos climáticos que influyen en su funcionamiento, en la tercera sección se escogió el tipo de equipo a realizar el estudio de acuerdo a las condiciones ambientales de la región, en la cuarta sección se aplican los cálculos de los métodos teóricos mediante el software EES y en la quinta sección se presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes para el caso de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar el desempeño de equipos de enfriamiento evaporativo en diferentes condiciones climáticas que se presentan en la ciudad de Montería mediante simulaciones para mejorar su eficiencia.

Objetivos específicos

- Identificar la influencia de las condiciones climáticas como la temperatura ambiente, humedad relativa y la velocidad del flujo de aire.
- Modelar un sistema de enfriamiento evaporativo susceptible a variaciones en las condiciones de humedad relativa y temperatura ambiente, mediante el software EES SOLVER.
- Evaluar el comportamiento del sistema de enfriamiento evaporativo frente a cambios en las condiciones climáticas.

DESARROLLO DEL TEMA

1. Equipos evaporativos

El enfriamiento evaporativo es el método de enfriamiento más eficiente en climas cálidos y secos. Los pueblos antiguos se dieron cuenta de la competencia de la evaporación del agua en el enfriamiento del aire y la usaron de diferentes maneras. Solían colocar vasijas de barro con agua potable en las ventanas; así, cuando el aire pasa cerca de las grandes paredes porosas de la olla, el agua se evapora y enfría el aire (Abdullah et al., 2019).

Hay dos formas tradicionales de enfriamiento evaporativo: enfriamiento evaporativo directo y enfriamiento evaporativo indirecto. Para DEC, el aire y el agua están en contacto directo, y el principio de evaporación del agua para absorber el calor latente se utiliza para lograr el enfriamiento. Para IEC, se basa en la transferencia de calor y masa entre el aire de un lado y el aire con agua de enfriamiento IEC se considera una tecnología de enfriamiento adecuada para muchas aplicaciones HVAC (Porumb, Ungureşan, et al., 2016), El DPEC es un nuevo tipo mejorado de IEC, la temperatura del aire se puede procesar por debajo de la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura más baja se puede alcanzar hasta la temperatura del punto de rocío. DPEC se ha utilizado ampliamente en los campos de enfriamiento de equipos electrónicos y energía hidroeléctrica. Además, la aplicación de DPEC es mejor en regiones secas especialmente.(Lv et al., 2021)

1.1. Eficiencia energética en HVAC

Una de las alertas más importantes de nuestra época es que la temperatura de la tierra ha aumentado entre 1,0 °C y 3,7°C, Los sistemas HVAC afectan en gran medida su entorno debido al CO₂, ya que provocan el cambio climático y el calentamiento global (Bac et al., 2021). En las regiones cálidas y húmedas, la energía consumida al enfriar y deshumidificar el aire de ventilación fresco representa entre el 20% y el 40% del consumo total de energía de los sistemas HVAC (Li et al., 2021). Un sistema de enfriamiento evaporativo puede ser una alternativa ideal, o como pre-enfriador para cualquier sistema convencional de compresión de vapor en el sector de la construcción (Venkateswara Rao & Datta, 2020).

Dado que el ahorro de energía se ha convertido en una prioridad para muchos países, ya que los edificios representan el 20% del consumo total de energía en todo el mundo (Chaouch et al., 2021).

2. Características de Montería

2.1. Condiciones climáticas

El IDEAM, es el establecimiento público encargado del levantamiento y manejo de la información científica y técnica sobre los ecosistemas que forman parte del patrimonio ambiental del país, así como establecer las bases técnicas para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de planificación y ordenamiento del territorio (IDEAM, 2021). En Colombia se presentan dos estaciones invierno y verano, por regla general corresponde al verano en la costa atlántica y los llanos Orientales los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y parte de abril. El resto de año es de lluvias, llamado impropiaamente invierno (Molano, 2005).

En Montería se presentaron unas condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire en el año 2019, en los cuales se pudieron registrar gracias a la estación meteorológica que se encuentra presente en el barrio los garzones de la ciudad dando como resultado los siguientes datos (TuTiempo Network, 2021).

Tabla 1. Temperatura y humedad relativa en Montería 2019 (Tú Tiempo Network, 2021)

MES	T. Max. (°C)	T. Media (°C)	H.R %	V. Aire (Km/h)
ENERO	35.0	28.8	73.0	5.9
FEBRERO	35.7	29.3	71.2	6.6
MARZO	35.5	29.6	69.6	9.3
ABRIL	35.6	29.6	72.5	6.8
MAYO	34.0	28.6	80.5	4.7
JUNIO	34.2	29.1	81.2	3.4
JULIO	34.2	29.0	79.7	4.7
AGOSTO	34.4	28.8	80.2	7.1
SEPTIEMBRE	33.7	28.0	83.1	6.4
OCTUBRE	32.4	27.6	82.5	5.6
NOVIEMBRE	33.6	28.4	80.0	6.2
DICIEMBRE	34.1	28.9	78.2	5.6

2.2. Consumo de energía

El consumo total de energía eléctrica y combustibles en el municipio es de 1.399 [GWh/año], de los cuales un 39% corresponde a combustibles para el transporte, un 16% a combustibles de uso térmico y un 45% a electricidad. En términos sectoriales, se observa que los principales sectores consumidores son el residencial y privado, con respectivamente 49% y 46% del total, mientras que el sector público representa el 5% del consumo. (*Estrategia Energética Local de MONTERÍA, 2019*)

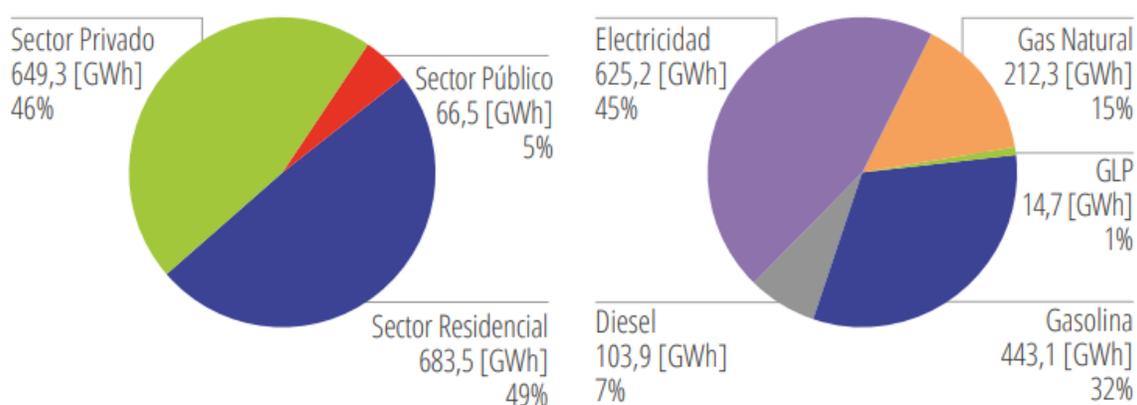


Ilustración 1. Distribución de consumo por sectores y tipos de fuentes de energía, 2016 (Estrategia Energética Local de MONTERÍA, 2019).

El sector con mayor potencial de reducción es el transporte, donde se podría reducir el consumo actual en un 49%, asociado principalmente al recambio de la flota por vehículos eléctricos. Sin embargo, debido a la baja penetración del electro movilidad en Colombia y altos costos de la tecnología, este potencial ni puede ser aprovechado mayormente. En el caso del sector residencial, el consumo actual de electricidad se podría reducir en un 31%, implementando medidas de recambio de aparatos como neveras, ventiladores e iluminación (*Estrategia Energética Local de MONTERÍA, 2019*).

ESTADO DEL ARTE

A continuación, se explicarán las investigaciones más notorias y destacadas realizadas por diversos autores, en las cuales adelantaron estudios de eficiencia energéticas de equipos de enfriamiento evaporativos, haciendo énfasis en las condiciones climáticas en las que se encuentran.

Recientemente, las paredes de enfriamiento evaporativo pasivo hechas de materiales porosos como cerámica se utilizan para enfriar el aire que ingresa a los edificios. Además, se realizaron muchos estudios para examinar la eficacia del enfriamiento por evaporación en torres eólicas mediante el uso de sistemas de rociado de agua y la colocación de diseños dentro de su construcción, que son de interés en este estudio (Abdullah et al., 2019).

La IEC es una de las aplicaciones de recuperación de calor y ahorro de energía más prometedoras. Se puede aplicar para la recuperación de energía de los sistemas de aire acondicionado. A diferencia del intercambiador de calor de placas tradicional, un IEC puede funcionar en condiciones de clima húmedo y generar aire de refrigeración a través de la evaporación del agua en los canales de aire de escape (Liu et al., 2020).

Además, la refrigeración por evaporación también puede ofrecer otras ventajas importantes, como la simplicidad de funcionamiento, bajos costes iniciales y de mantenimiento, buena calidad del aire interior, baja contaminación y bajo consumo energético de alto grado (Guan et al., 2015). El principio de transferencia de calor y masa entre el agua y el aire en los IEC es muy similar al de la torre de enfriamiento y el humidificador. Varios tipos de unidades IEC, como el tipo de placa, el tipo irregular y el tipo de tubo. Los tipos de placas de una etapa se utilizan ampliamente en aplicaciones de recuperación de energía como calefacción, ventilación y aire acondicionado, y sistemas desecantes por su alta eficiencia y bajo consumo de energía (Adam et al., 2021).

Las novedosas tecnologías de refrigeración pasivas que se pueden instalar en espacios de edificios se benefician de una fuente de energía renovable, ya sea mediante el uso directo o después de su conversión a una forma utilizable, para reducir las demandas de energía térmica del espacio sin violar los cómodos requisitos interiores.

Quizás la técnica pasiva más famosa que convierte la energía solar en energía eléctrica útil directa en los edificios es la tecnología fotovoltaica. Las células solares, que se colocan en el panel fotovoltaico, normalmente convierten hasta el 25% de la energía solar en electricidad, mientras que el resto se desperdicia, pero posiblemente se convierte en calor (Al Touma & Ouahrani, 2019).

En (Harby & Al-Amri, 2019). Realizaron una investigación experimental sobre el ahorro de energía de un aire acondicionado en una amplia gama de condiciones climáticas, en esta investigación se desarrollaron 5 pruebas variando las condiciones de temperatura y humedad relativa, dando como resultado que a medida que subía la temperatura ambiente la potencia suministraba aumentaba y la capacidad de enfriamiento producida disminuye.

En (Porumb, BĂlan, et al., 2016), Realizaron un estudio de evaluación del potencial de enfriamiento evaporativo, el cual tiene como objetivo, evaluar el potencial de la tecnología de enfriamiento por evaporación indirecta para reducir el consumo de energía del sistema de aire acondicionado fresco, de un edificio de oficinas en las condiciones climáticas de Cluj-Napoca, Rumania.

En (Porumb, Ungureșan, et al., 2016), Realizaron una revisión de las condiciones de funcionamiento y rendimiento del enfriamiento evaporativo indirecto. Para poder encontrar las mejores condiciones de eficiencia energética del equipo.

En (Chauhan & Rajput, 2015), Trataron como tema principal la utilización de un sistema de aire acondicionado combinado basado en compresión de vapor evaporativo para proporcionar buenas condiciones de confort humano a bajo costo trabajando en climas cálidos y secos. El sistema propuesto se analiza teóricamente para el clima cálido y seco de Bhopal, India. El sistema propuesto también se comparó con el acondicionador de aire de compresión de vapor convencional. El ahorro de carga de refrigeración en la bobina fue máximo con un valor de 64,19% en el mes de marzo debido a menor exterior temperatura, humedad y es mínima para el mes de mayo con un valor de 27,36% debido a temperatura exterior más alta. Por lo tanto, podría ser una mejor alternativa para climas cálidos y secos con una amortización período de 6,6 años.

METODOLOGÍA

3. Influencia de las condiciones climáticas

En los últimos años, la temperatura de los alrededores ha aumentado debido a la contaminación causada por la emisión de gases de vehículos, plantas industriales, electrodomésticos, etc. El sistema de aire acondicionado mejora el confort, pero tiene limitaciones como el consumo excesivo de energía, sequedad de la piel, contaminación, etc. Sin embargo, el problema de la temperatura ambiente elevada puede resolverse con el uso de un sistema de enfriamiento personalizado que proporcione confort a una temperatura ambiente de fondo alta. Aun así, el requisito de que la humedad en el espacio se mantenga a un nivel aceptable por motivos de comodidad significa que el suministro de aire fresco debe tratarse para reducir su humedad en el espacio (El Loubani et al., 2021).

Otro método alternativo es el enfriamiento evaporativo, este método se utiliza principalmente en climas cálidos y secos y es eficaz debido a su bajo costo inicial y mantenimiento. Proporciona el mismo nivel de refrigeración con menos consumo de energía, lo que ahorra entre un 60 y un 80% de energía en comparación con el ciclo de refrigeración por compresión de vapor convencional. El ahorro de energía depende de la temperatura ambiente y el nivel de humedad. (Shiva et al., 2021). Muchas técnicas de enfriamiento pasivo que son adecuadas para aplicaciones de alta temperatura ambiente y clima árido han atraído la atención de los investigadores en las últimas décadas (Katramiz et al., 2020). Los enfriadores evaporativos más utilizados son DEC y los IEC, con efectividades muy altas, pero se acompaña de un aumento de la humedad que produce molestias térmicas para los ocupantes. Para aliviar la influencia de la humedad, se utilizan los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (Sajjad et al., 2021).

En particular los sistemas de enfriamiento por desecante líquido impulsados por energía solar térmica han pasado a primer plano debido a su efecto desinfectante en el aire de proceso, alto coeficiente termodinámico de rendimiento, facilidad de almacenamiento del desecante y uso efectivo de fuentes de calor de bajo grado (Ghosh & Bhattacharya, 2021).

4. Condiciones experimentales

En el caso de estudio se escogió el mes de febrero dado que es el mes con una media de valores más próxima a las condiciones anuales, por lo que en la tabla 2 se presentan los datos climáticos de Montería en febrero.

Tabla 2 Datos climáticos de Montería en Febrero 2019 (TuTiempo Network, 2021).

Días	T amb. (°C)	H.R	V. Aire (m/s)
1	35.4	0.75	1.964
2	35.4	0.74	1.277
3	35.0	0.73	0.861
4	35.2	0.71	2.777
5	36.0	0.70	1.083
6	36.4	0.71	1.638
7	36.4	0.72	2.166
8	36.0	0.70	1.444
9	36.8	0.69	1.444
10	35.4	0.68	1.750
11	35.8	0.73	1.944
12	36.0	0.71	1.861
13	36.6	0.74	2.055
14	34.8	0.74	2.166
15	33.2	0.76	2.250
16	33.0	0.75	2.000
17	35.0	0.73	1.638
18	35.2	0.69	2.250
19	35.4	0.73	2.250
20	35.0	0.73	1.916
21	36.4	0.71	1.555
22	36.6	0.68	2.666
23	36.2	0.75	1.805
24	36.0	0.67	1.944
25	37.0	0.69	1.944
26	37.4	0.64	1.750
27	35.0	0.69	1.222
28	36.0	0.67	1.805

Se han hecho los siguientes supuestos para el análisis de rendimiento del enfriador de aire.

1. Existen condiciones de estado estacionario durante todo el experimento.
2. Se descuidan los efectos de la radiación.
3. La densidad del aire exterior permanece constante durante todo el análisis.
4. Todo el sistema funciona a presión atmosférica (1 bar).
5. La almohadilla de enfriamiento está continuamente saturada de agua.
6. El calor de vaporización del agua es constante y 2270 kJ / kg .
7. No hay transferencia de calor durante el proceso ya que las paredes están aisladas.

Se llevaron a cabo experimentos para evaluar el rendimiento de la unidad de enfriamiento evaporativo directo operada con dos tipos de almohadilla de enfriamiento, a saber, almohadillas de enfriamiento Honeycomb o panal y almohadillas de enfriamiento de paja Aspen (Bishoyi & Sudhakar, 2017).

Las almohadillas tipo panal son muy usadas por su alta eficiencia y facilidad de instalación y mantenimiento, su estructura está organizada de una manera que mejora la transferencia de calor del aire con el agua, además no se deterioran con facilidad en la ilustración 2 se puede apreciar este tipo de paneles, en el caso de estudio se alto, longitud y ancho son de 87cm, 61cm y 10cm.



Ilustración 2. Almohadilla tipo panal o Honeycomb (AviNew, 2021).

Las almohadillas tipo Aspen o de paja son muy económicas, además de cuentan con una buena capacidad de refrigeración, pero son de muy fácil deterioro y tienen una estructura entre lazada, pero no cuenta con una organización lo que provoca que tenga una menor eficiencia, en la ilustración 3 se muestran este tipo de almohadillas, en nuestro caso el alto, la longitud y ancho son de 87cm, 61cm y 2.5cm.



Ilustración 3. Almohadilla tipo Aspen o paja (VentDepot, 2021).

Se llevaron a cabo experimentos para evaluar el rendimiento de la unidad de enfriamiento evaporativo directa operada con dos tipos de almohadilla de enfriamiento, a saber, almohadillas de enfriamiento Honeycomb y almohadillas de enfriamiento de pantano Aspen (Bishoyi & Sudhakar, 2017).

5. Modelo matemático

Un enfriador evaporativo directo funciona cuando el aire caliente y seco pasa sobre la superficie de una almohadilla mojada; el aire perderá su calor sensible, reduciendo así su temperatura. En la figura 4 se muestra el proceso el proceso por evaporación en un gráfico psicométrico. Este proceso se representa como un proceso de temperatura de bulbo húmedo constante.

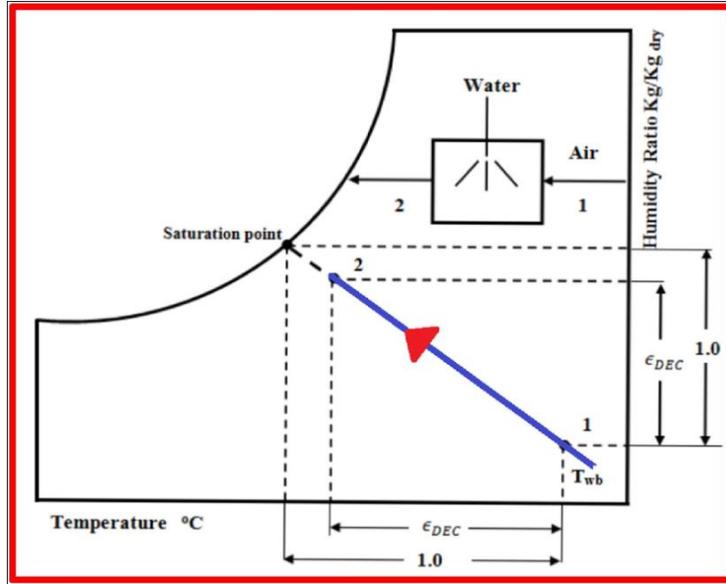


Ilustración 4. Proceso de evaporación directa psicométrico (Bishoyi & Sudhakar, 2017).

La almohadilla de enfriamiento por evaporación directa se puede considerar básicamente como un intercambiador de calor de flujo cruzado. Basado en la aplicación de la teoría clásica de transferencia de calor, se puede utilizar el método LMTD para el análisis. La tasa de transferencia de calor del aire al agua en la superficie mojada Q está dada por la ecuación (1) la cual se expresa a continuación.

$$Q = \bar{h} \cdot A \cdot \Delta T_{LM} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Donde ΔT_{LM} la temperatura media logarítmica, la diferencia viene dada como la ecuación (2) que se puede presentar como.

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}}\right)} \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (1) y reagrupando los términos, se obtiene la ecuación (3).

$$1 - \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} = \exp\left(-\frac{\bar{h} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{Q}\right) \quad (3)$$

donde los términos $(T_1-T_2)/(T_1-T_{wb})$ se define como la eficacia del panel ε , o eficiencia de enfriamiento, es decir, que la eficacia de los paneles está dada por la ecuación (4).

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} \quad (4)$$

De la ecuación (3) podemos inferir que, la efectividad del panel evaporativo también se puede presentar de otro caso, como es la ecuación (5).

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{\bar{h} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{Q}\right) \quad (5)$$

La efectividad también se puede escribir como se presenta en la ecuación (6).

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{\bar{h} \cdot A}{m \cdot c_p}\right) \quad (6)$$

para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección en un medio evaporativo de papel de celulosa rígido, se tiene que se halla mediante el número de Nusselt que este dado por la ecuación (7):

$$Nu = 0.10 \left(\frac{l_e}{l}\right)^{0.12} Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (7)$$

Donde l_e se define como

$$l_e = \frac{V}{A} \quad (8)$$

La temperatura del aire que sale del panel de evaporación T_2 se puede calcular a partir de la ecuación (4) como

$$T_2 = T_1 - \varepsilon \cdot (T_1 - T_{wb}) \quad (9)$$

El método de cambio de aire se utiliza para diseñar un enfriador de aire por evaporación. Se basa en la tasa de cambio de aire que se toma de los códigos y estándares para aplicaciones específica, la cual se presenta como la tabla 6 en la sección de anexos.

Una vez que se determina la tasa de cambio de aire, la tasa de flujo de aire se calcula a partir de la ecuación (10) que se presenta como:

$$m = \frac{\rho \cdot V \cdot ACR}{3600} \quad (10)$$

La relación de eficiencia energética se define como la energía térmica neta extraída del aire con fines de refrigeración por vatio de energía consumida, es decir,

$$ERR = 3.412 \cdot \frac{Q}{W} \quad (11)$$

Donde el consumo de energía eléctrica del extractor y la bomba de agua es de 185W. La tabla 3 proporciona el ranking de energía de los enfriadores basados en EER.

Tabla 3. Grupo energético de los enfriadores (Bishoyi & Sudhakar, 2017).

Clasificación	Ranking de energía	EER
1	A	$EER \geq 65$
2	B	$58 \leq EER \leq 65$
3	C	$50 \leq EER \leq 58$
4	D	$42 \leq EER \leq 50$
5	E	$34 \leq EER \leq 42$
6	F	$26 \leq EER \leq 34$
7	G	$EER \leq 26$

Para el estudio se escogerá un ACH de 8

$$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = \frac{\rho \cdot V \cdot ACR}{3600} = 0.3083 \text{ Kg/s}$$

$$C_p = \text{calor específico constante} = 1005 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

RESULTADOS

Con los datos proporcionados y usando las ecuaciones más acordes al sistema que estamos evaluando, pudimos encontrar los datos más relevantes y el comportamiento de un sistema de refrigeración evaporativo, los cuales se presentan para los 2 tipos de paneles disponible, dado así que en la tabla 4 y tabla 5 tenemos los datos de las pruebas.

Tabla 4. Resultados de rendimiento para la almohadilla tipo Aspen (Resultados EES).

Dias	T amb	Twb	T Aspen	Humedad	e Aspen	Q Aspen	EER Aspen
1	35.400	31.310	34.590	0.750	0.199	252.500	4.657
2	35.400	31.130	34.780	0.740	0.146	192.600	3.553
3	35.000	30.590	34.520	0.730	0.109	148.500	2.739
4	35.200	30.410	33.980	0.710	0.254	377.100	6.955
5	36.000	30.960	35.350	0.700	0.129	201.200	3.711
6	36.400	31.510	35.550	0.710	0.175	264.600	4.880
7	36.400	31.700	35.400	0.720	0.213	311.100	5.738
8	36.000	30.960	35.200	0.700	0.159	248.900	4.590
9	36.800	31.500	35.960	0.690	0.159	261.400	4.821
10	35.400	30.040	34.420	0.680	0.183	304.300	5.613
11	35.800	31.320	34.910	0.730	0.198	274.200	5.058
12	36.000	31.140	35.070	0.710	0.192	288.300	5.317
13	36.600	32.250	35.700	0.740	0.206	277.400	5.116
14	34.800	30.580	33.900	0.740	0.214	279.700	5.158
15	33.200	29.440	32.370	0.760	0.220	256.600	4.732
16	33.000	29.080	32.210	0.750	0.202	245.700	4.532
17	35.000	30.590	34.230	0.730	0.175	239.300	4.413
18	35.200	30.040	34.070	0.690	0.219	350.400	6.463
19	35.400	30.950	34.420	0.730	0.220	302.300	5.575
20	35.000	30.590	34.140	0.730	0.196	267.900	4.941
21	36.400	31.510	35.580	0.710	0.168	254.800	4.699
22	36.600	31.130	35.250	0.680	0.247	418.100	7.711
23	36.200	32.060	35.420	0.750	0.188	240.800	4.440
24	36.000	30.390	34.890	0.670	0.198	343.000	6.325
25	37.000	31.680	35.950	0.690	0.197	325.200	5.999
26	37.400	31.070	36.240	0.640	0.183	358.600	6.613
27	35.000	29.860	34.280	0.690	0.141	224.400	4.140
28	36.000	30.390	34.950	0.670	0.187	325.200	5.998

Tabla 5. Resultados de rendimiento para la almohadilla tipo Panal (resultados EES).

Dias	T amb	Twb	T Panal	Humedad	e Panal	Q Panal	EER Panal
1	35.400	31.310	34.640	0.750	0.185	234.100	4.318
2	35.400	31.130	34.830	0.740	0.135	178.200	3.286
3	35.000	30.590	34.560	0.730	0.100	137.100	2.529
4	35.200	30.410	34.070	0.710	0.236	350.500	6.465
5	36.000	30.960	35.400	0.700	0.119	185.900	3.429
6	36.400	31.510	35.610	0.710	0.162	245.000	4.519
7	36.400	31.700	35.470	0.720	0.198	288.600	5.323
8	36.000	30.960	35.260	0.700	0.147	230.300	4.248
9	36.800	31.500	36.020	0.690	0.147	241.900	4.461
10	35.400	30.040	34.490	0.680	0.170	281.900	5.199
11	35.800	31.320	34.980	0.730	0.183	254.200	4.689
12	36.000	31.140	35.140	0.710	0.178	267.100	4.927
13	36.600	32.250	35.770	0.740	0.191	257.200	4.744
14	34.800	30.580	33.960	0.740	0.198	259.500	4.785
15	33.200	29.440	32.430	0.760	0.204	238.100	4.391
16	33.000	29.080	32.260	0.750	0.188	227.800	4.202
17	35.000	30.590	34.280	0.730	0.162	221.600	4.086
18	35.200	30.040	34.150	0.690	0.204	325.100	5.997
19	35.400	30.950	34.490	0.730	0.204	280.500	5.173
20	35.000	30.590	34.200	0.730	0.182	248.300	4.579
21	36.400	31.510	35.640	0.710	0.156	235.900	4.350
22	36.600	31.130	35.350	0.680	0.229	388.500	7.164
23	36.200	32.060	35.480	0.750	0.174	223.100	4.114
24	36.000	30.390	34.970	0.670	0.183	317.900	5.864
25	37.000	31.680	36.030	0.690	0.183	301.500	5.560
26	37.400	31.070	36.330	0.640	0.169	332.200	6.126
27	35.000	29.860	34.330	0.690	0.130	207.500	3.827
28	36.000	30.390	35.030	0.670	0.174	301.300	5.557

Ahora bien, la ilustración 5 nos muestra el comportamiento de las temperaturas ambientes y la temperatura de salida de los tipos de paneles. Podemos identificar que la temperatura ambiente máxima y mínima fue de 37.4°C y 33°C, de la figura 6 también podemos destacar que la humedad relativa del ambiente máxima y mínima fue de 76% y 64%. En la almohadilla tipo aspen podemos observar que la temperatura de máxima y mínima de salida del panel fue de 36.24°C y 32.21°C. Respectivamente en la almohadilla tipo panal se presentan temperaturas máxima y mínima de 36.33°C y 32.26°C. Por lo que se puede observar que la diferencia de temperatura de salida de los paneles es menor a 1°C.

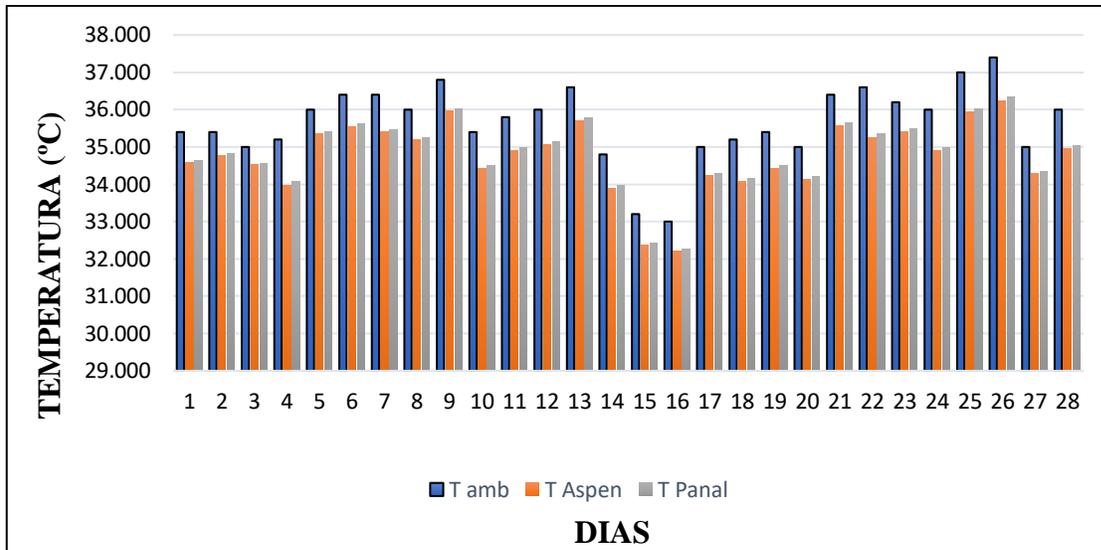


Ilustración 5. Variación de temperatura de bulbo seco (ambiente, almohadilla aspen y panal) (elaboración propia).

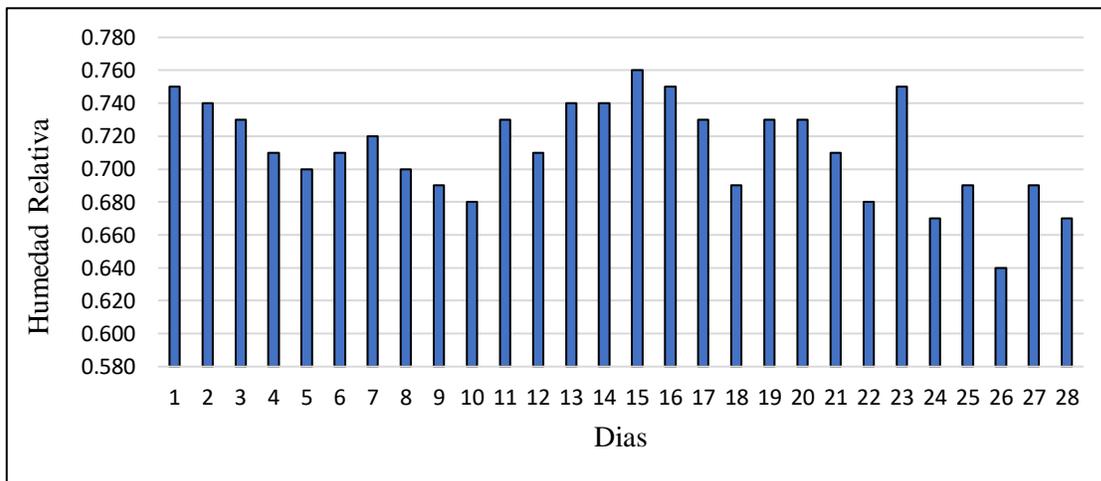


Ilustración 6. Variación de la Humedad relativa en el febrero (elaboración propia).

En la figura 7 se presentan la efectividad de las dos almohadillas. Este parámetro es muy importante en nuestro caso de estudio, de la gráfica podemos exponer de que la almohadilla de enfriamiento de tipo aspe es mayor que la de panal. Por lo que podemos ver que cuando hay una eficiencia máxima es cuando se presenta la mayor diferencia de temperatura ambiente con la temperatura interna del recinto.

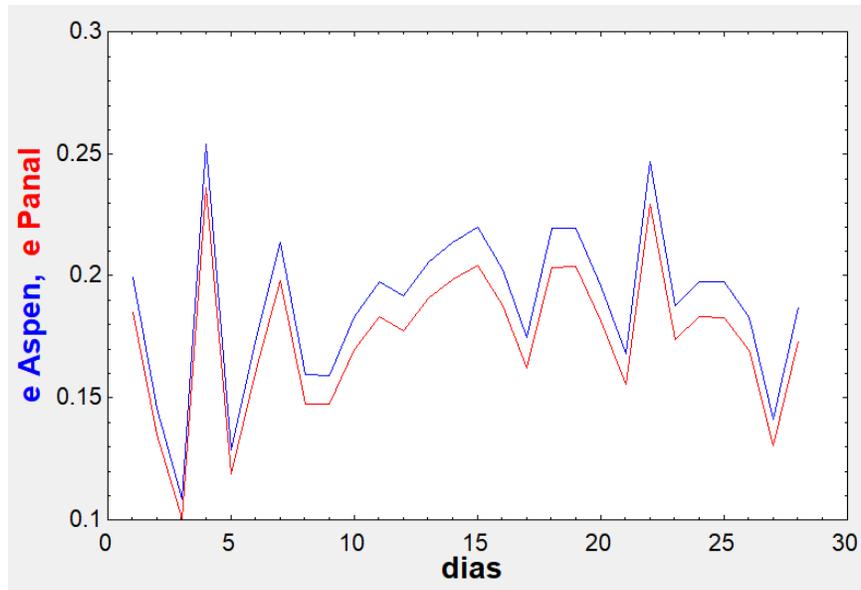


Ilustración 7. Eficacia de cada una de las almohadillas en los días (EES SOLVER).

Podemos observar que la capacidad de enfriamiento en la almohadilla tipo aspen es más alta que la de panal, como se presenta en la ilustraciones 8 y 9. La capacidad de enfriamiento se observó se obtuvo a partir de los datos que se proporcionaron de los 28 días del mes, se obtuvo una capacidad de enfriamiento máxima de 418.1 W en el caso de la almohadilla aspen y en el caso de la almohadilla de panal solo se obtuvo un máximo de 388.5 W.

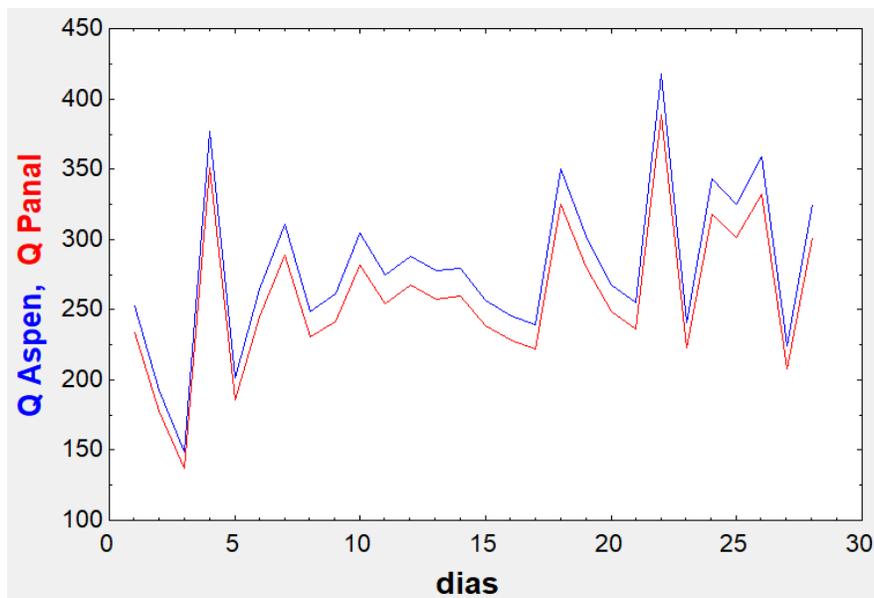


Ilustración 8. Capacidad de enfriamiento de las almohadillas (EES SOLVER).

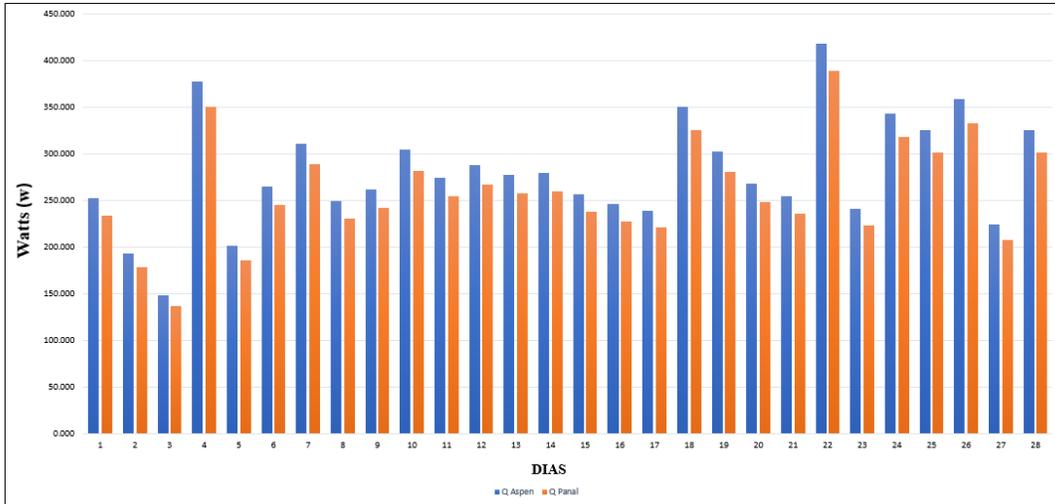


Ilustración 9. Capacidad de enfriamiento de las almohadillas (elaboración propia).

Por ultimo uno de los indicadores más importante y más simples de encontrar, y entender en el ámbito del común es el índice de eficiencia energética, en el cual se presenta en la ilustración 10, donde podemos observar la variación del índice de eficiencia del enfriador con las dos configuraciones, el EER está relacionado con la capacidad de enfriamiento por lo cual se puede encontrar que el máximo EER se da en la configuración de almohadilla tipo Aspen con un rendimiento del 7.711 mientras que en el caso de la almohadilla tipo Panal fue de 7.164, por lo que ambas configuraciones dan que, el equipo tiene una clasificación de G en el Rankin de energía para las dos configuraciones de almohadillas.

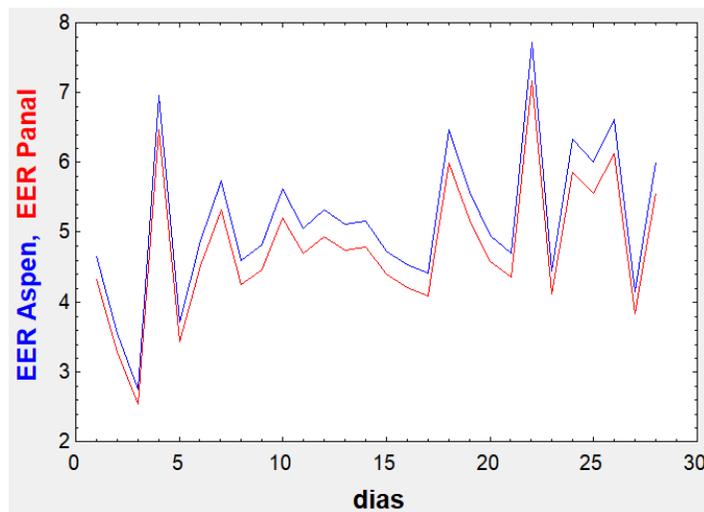


Ilustración 10. Relación de la eficiencia energética del equipo (EES SOLVER).

CONCLUSIONES

Con respecto a la temática de eficiencia de un equipo de refrigeración evaporativo directo, se puede decir que, utilizando dos tipos de almohadillas distintas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Usando las almohadillas de enfriamiento tipo aspen puede reducir la temperatura de 1.22°C, mientras que en las almohadillas panal solo puede una reducción máxima de 1.13°C.

La capacidad del equipo con almohadillas tipo aspen varía desde 148.5 a 418.1 W, comparándolo con la almohadilla tipo panal con una variación de 137.1 a 388.5 W.

La clasificación de por el EER nos demuestra que el equipo bajo las condiciones de alta humedad pierda la mayor parte de la eficiencia dado que su principio de trabajo tiene la limitante de que tanta humedad se puede aplicar al sistema, por lo cual obtienen una clasificación de G en el Ranking.

Por lo que se llega a la conclusión de que las almohadillas de tipo aspen demostraron ser de mejor eficiencia bajo estas condiciones ambientales, dando así un mejor rendimiento al equipo en comparación de las almohadillas tipo panal, pero se pudo evidenciar que el factor más influyente en el rendimiento de un equipo evaporativo es la humedad relativa del sitio de trabajo dado que este limitara mucho su eficiencia.

BIBLIOGRAFIA

- Abdullah, A., Said, I. Bin, & Ossen, D. R. (2019). A sustainable bio-inspired cooling unit for hot arid regions: Integrated evaporative cooling system in wind tower. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114201>
- Adam, A., Han, D., He, W., & Amidpour, M. (2021). Analysis of indirect evaporative cooler performance under various heat and mass exchanger dimensions and flow parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 176, 121299. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121299>
- Al Touma, A., & Ouahrani, D. (2019). Evaporatively-cooled façade integrated with photovoltaic thermal panel applied in hot and humid climates. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.129>
- AviNew. (2021). *PERIcool, Panel evaporativo de Termotecnica Pericoli - aviNews, la rivista global de avicoltura*. Revista Gloval. <https://avicultura.info/producto/pericool-panel-evaporativo-termotecnica-pericoli/#>
- Bac, U., Alaloosi, K. A. M. S., & Turhan, C. (2021). A comprehensive evaluation of the most suitable HVAC system for an industrial building by using a hybrid building energy simulation and multi criteria decision making framework. *Journal of Building Engineering*, 37, 102153. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102153>
- Bishoyi, D., & Sudhakar, K. (2017). Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India. *Energy and Buildings*, 153, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>
- Chaouch, H., Çeken, C., & Arı, S. (2021). Energy management of HVAC Systems in smart buildings by using fuzzy logic and M2M communication. *Journal of Building Engineering*, 44, 102606. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102606>
- Chauhan, S. S., & Rajput, S. P. S. (2015). Thermodynamic analysis of the evaporative-vapour compression based combined air conditioning system for hot and dry climatic conditions. *Journal of Building Engineering*, 4, 200–208.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.09.010>

El Loubani, M., Ghaddar, N., Ghali, K., & Itani, M. (2021). Hybrid cooling system integrating PCM-desiccant dehumidification and personal evaporative cooling for hot and humid climates. *Journal of Building Engineering*.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101580>

Estrategia Energética Local de MONTERÍA. (2019).

Ghosh, A., & Bhattacharya, J. (2021). A solar regenerated liquid desiccant evaporative cooling system for office building application in hot and humid climate. *Thermal Science and Engineering Progress*. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100804>

Guan, L., Bennett, M., & Bell, J. (2015). Evaluating the potential use of direct evaporative cooling in Australia. *Energy and Buildings*.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.020>

Harby, K., & Al-Amri, F. (2019). An investigation on energy savings of a split air-conditioning using different commercial cooling pad thicknesses and climatic conditions. *Energy*, 182, 321–336. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.031>

IDEAM, A. al M. de A. y D. S. (2021, May 23). *ACTOS ADMINISTRATIVOS - ACREDITACIÓN - IDEAM*. ACREDITACION DE LABORATORIOS AMBIENTALES EN COLOMBIA. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/acreditacion>

Katramiz, E., Al Jebaei, H., Alotaibi, S., Chakroun, W., Ghaddar, N., & Ghali, K. (2020). Sustainable cooling system for Kuwait hot climate combining diurnal radiative cooling and indirect evaporative cooling system. *Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119045>

Li, W., Shi, W., Wang, J., Li, Y., & Lu, J. (2021). Experimental study of a novel household exhaust air heat pump enhanced by indirect evaporative cooling. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110808>

- Liu, Q., Guo, C., Ma, X., You, Y., & Li, Y. (2020). Experimental study on total heat transfer efficiency evaluation of an indirect evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115287>
- Lv, J., Xu, H., Zhu, M., Dai, Y., Liu, H., & Li, Z. (2021). The performance and model of porous materials in the indirect evaporative cooling system: A review. *Journal of Building Engineering*, 41(May), 102741. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102741>
- Ma, Y., & Guan, L. (2015). Performance Analysis of Solar Desiccant-Evaporative Cooling for a Commercial Building under Different Australian Climates. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1024>
- Molano, J. (2005). Sociedad geográfica de colombia academia de ciencias geográficas calendario climatológico aeronáutico colombiano. In *Sociedad geografica de Colombia* (Vol. 15). www.sogeocol.edu.co
- Porumb, B., BĂlan, M., & Porumb, R. (2016). Potential of Indirect Evaporative Cooling to Reduce the Energy Consumption in Fresh Air Conditioning Applications. *Energy Procedia*, 85, 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.224>
- Porumb, B., Ungureșan, P., Tutunaru, L. F., Șerban, A., & BĂlan, M. (2016). A Review of Indirect Evaporative Cooling Operating Conditions and Performances. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.226>
- Roca Villanueva, B., Beltrán Salvador, M., & Gómez Huelgas, R. (2019). Change climate and health. *Revista Clinica Espanola*, 219(5), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.rce.2019.01.004>
- Sajjad, U., Abbas, N., Hamid, K., Abbas, S., Hussain, I., Ammar, S. M., Sultan, M., Ali, H. M., Hussain, M., Rehman, T. ur, & Wang, C. C. (2021). A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105140>
- Shiva, kumar, Salins, S. S., Reddy, S. V. K., & Nair, P. S. (2021). Comparative performance analysis of a static & dynamic evaporative cooling pads for varied

climatic conditions. *Energy*, 121136. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121136>

TuTiempo Network, S. . (2021, May 18). *Clima en Monteria / Los Garzones - Históricos el tiempo en 2019*. Clima Mnteria/ Los Garzones.

<https://www.tutiempo.net/clima/2019/ws-800630.html>

Venkateswara Rao, V., & Datta, S. P. (2020). A feasibility assessment of single to multi/hybrid evaporative coolers for building air-conditioning across diverse climates in India. *Applied Thermal Engineering*.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114813>

VentDepot. (2021). *Equipo de Aire Evaporativo*.

World Bank Group. (2016). World Bank Group Climate Change Action plan 2016-2020.

World Bank Group, 74.

<https://www.worldbank.org/en/news/statement/2021/04/02/world-bank-group-president-statement-on-climate-change-action-plan>

ANEXOS

Tabla 6. ACR por hora en diferentes ubicaciones(Bishoyi & Sudhakar, 2017).

Ubicación del sitio	ACR
Residencial	
Sótanos	3-4
Dormitorios	5-6
Cuartos de baño	6-7
Salas De Estar Familiares	6-8
Cocinas	7-8
Ropa sucia	8-9
Comercial ligero Oficinas	
Oficinas Comerciales	6-8
Salas de descanso para el almuerzo	7-8
Salas de conferencias	8-12
Médico / Hospitales	9-10
Sala de Copias	10-12
Salas de Computadoras Principales	10-14
Edificios públicos	
Pasillos	6-8
Tiendas minoristas	6-10
Vestíbulos	8-10
Iglesias	8-12
Baños	10-12
Auditorios	10-12
Habitaciones para fumadores	15-20

Tabla 7. valores de Velocidad de flujo(V), Reynolds (Re), Nusset (Nu) y Coeficiente convectivo (\bar{h}).

V flujo	Re Aspen	Re Panal	Nu Aspen	Nu Panal	h Aspen	h Panal
1.964	1367.000	4576.000	26.830	69.050	60.680	46.640
1.277	888.700	2975.000	19.010	48.930	42.990	33.050
0.861	600.600	2011.000	13.890	35.740	31.370	24.110
2.777	1935.000	6477.000	35.400	91.110	79.990	61.490
1.083	751.100	2515.000	16.610	42.750	37.620	28.920
1.638	1133.000	3794.000	23.100	59.440	52.380	40.260
2.166	1499.000	5017.000	28.890	74.340	65.520	50.360
1.444	1001.000	3353.000	20.910	53.810	47.360	36.400
1.444	996.900	3337.000	20.840	53.630	47.310	36.370
1.750	1218.000	4077.000	24.430	62.880	55.230	42.460
1.944	1350.000	4519.000	26.560	68.360	60.130	46.220
1.861	1291.000	4321.000	25.620	65.930	58.030	44.610
2.055	1420.000	4755.000	27.690	71.250	62.840	48.310
2.166	1513.000	5064.000	29.080	74.840	65.640	50.460
2.250	1586.000	5309.000	30.180	77.680	67.800	52.120
2.000	1411.000	4725.000	27.490	70.740	61.700	47.430
1.638	1143.000	3825.000	23.230	59.790	52.470	40.330
2.250	1568.000	5248.000	29.910	76.960	67.560	51.930
2.250	1566.000	5242.000	29.900	76.960	67.610	51.980
1.916	1337.000	4474.000	26.340	67.780	59.480	45.720
1.555	1076.000	3602.000	22.160	57.020	50.240	38.620
2.666	1843.000	6169.000	34.060	87.640	77.260	59.390
1.805	1250.000	4186.000	25.000	64.340	56.680	43.570
1.944	1348.000	4514.000	26.510	68.220	60.030	46.140
1.944	1341.000	4488.000	26.420	67.980	60.010	46.130
1.750	1204.000	4031.000	24.220	62.330	55.070	42.330
1.222	852.400	2854.000	18.370	47.260	41.460	31.870
1.805	1252.000	4191.000	24.980	64.290	56.570	43.490