



ENFRIADOR ECOLÓGICO

Proyecto de Aplicación Profesional

Juan José Rodríguez Reyes

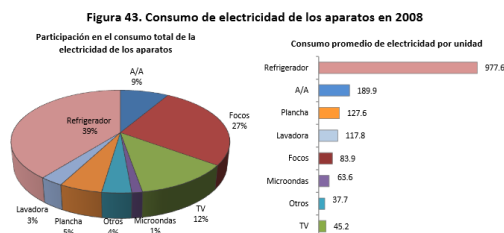
Descripción del problema

Casi la totalidad de la energía utilizada en el mundo proviene de fuentes no renovables. Esto sumado a un uso excesivo de la energía, afecta la disponibilidad de los recursos energéticos y genera un calentamiento antropogénico de la tierra. Hay un acuerdo internacional que dice que para mitigar los efectos del cambio climático es necesario reducir las emisiones de gases entre 80 y 95% de las emisiones de 1990 (Energy Research Knowledge Centre 2013). Para lograr este objetivo es urgente impulsar tecnologías que reduzcan el consumo de energía.

La Secretaría de Energía (SENER) de México menciona que el sector energético es un factor determinante para lograr combatir el cambio climático, aumentar el crecimiento económico y la distribución equitativa de las riquezas. Menciona que se debe cambiar las formas de producir y de consumir energía para lograr un uso más eficiente de los recursos energéticos. Algunas acciones que propone son el migrar a sistemas de iluminación más eficientes, instalar motores y bombas de alto rendimiento en la industria, establecer códigos de construcción que aprovechen mejor la energía de las viviendas o sustituir a electrodomésticos más eficientes. (SENER, 2011) Se estudiará en parte esta última acción.

En Europa, los edificios consumen 40% de la demanda energética. Sin contar iluminación, calefacción de agua, entre otras cosas, el consumo de aire acondicionado en el 2010 fue de 180 GW y se pronostica que aumentará a 270 GW en 2025, esto conlleva a que el aire acondicionado gasta aproximadamente 20% de la energía de países desarrollados. (Bader, 2014) En México la situación es distinta al representar un 8.7% del consumo en los hogares. (SENER, 2011) Aunque el acondicionamiento del aire sea el cuarto lugar en cuanto a consumo doméstico de energía y sólo represente una fracción del consumo total, es necesario abordar el problema energético de todos los ángulos posibles para poder mitigar el problema.

Al examinar el consumo de electricidad por aparato (Figura 43), se destaca que en 2008 los refrigeradores consumieron 40.3% de la electricidad, los focos emplearon 27.2%, 12.5% las televisiones y equipos de entretenimiento, 8.7% aires acondicionados y ventiladores, 5.6% las planchas, 3.0% las lavadoras, 1.4% los hornos de microondas, 0.4% equipo de cómputo, 0.4% las bombas de agua y 0.5% otros electrodomésticos.



Gráfica 1 Datos sobre consumo energético doméstico

El aumento del estándar confort y la reducción de los precios de aires acondicionados convencionales han aumentado la demanda de aire acondicionado más que nunca. A esto se le suma a la reciente tendencia arquitectónica de dejar más áreas transparentes en los hogares, lo cual contribuye a la reducción de comodidad térmica en temporadas calientes y por ende al uso de sistemas climatizadores. (Bader, 2014)

Debido al aumento de conciencia ecológica y al problema de las fuentes de energía, la investigación para métodos de enfriamiento más eficientes ha aumentado. Como se mencionó, el sistema de refrigeración más ampliamente utilizado utiliza ciclos de compresión de vapor, que además de ser ineficientes energéticamente hablando, los gases refrigerantes destruyen la capa de ozono (Bader 2014). Usar energía solar es una buena alternativa para enfriar aire debido a que muchas veces coincide la hora pico de consumo de energía debido a enfriamiento con la hora de mayor disponibilidad de radiación solar.

La alternativa que se investigará es la de enfriamiento evaporativo. Esta técnica para acondicionar aire es más eficiente energéticamente debido a que, a diferencia del enfriamiento tradicional que utiliza un sistema de compresores y ventiladores, éste sólo utiliza una pequeña bomba para mantener el agua circulando y un ventilador para mover el aire. Sin embargo, el sistema tiene limitaciones para enfriar aire en climas húmedos. Esto se ha solucionado utilizando una rueda desecante que se regenera con calor solar (Bader, 2014).

Aunque los climatizadores evaporativos comerciales consumen menos energía que los aires acondicionados convencionales, dichos equipos tienen cierto costo ambiental por su fabricación, almacenamiento y transporte, además que no son muy accesibles a personas de bajo ingreso económico.

Para el caso de este estudio, se buscarán alternativas para diseñar un equipo de enfriamiento evaporativo utilizando material reciclable o fácil de conseguir, para así disminuir los costos de fabricación de estos equipos y que gente de bajos recursos sobretodo de zonas áridas y cálidas tengan acceso a una alternativa de aire acondicionado económico y sustentable.

Teoría

El enfriamiento es una operación en la cual se transfiere calor de una región de temperatura inferior a una de temperatura superior; contrario al proceso natural en el cual la temperatura superior transfiere calor a la temperatura inferior para igualar temperaturas. Al equipo para realizar dicha acción se le llama refrigerador y operan utilizando ciclos de refrigeración. Los ciclos de refrigeración más comúnmente utilizados son los ciclos de vapor, en donde un gas (comúnmente CFC's) es evaporado, comprimido y condensado alternadamente para lograr el enfriamiento. Otros ciclos de refrigeración comunes en la industria son el ciclo de refrigeración de gas, refrigeración en cascada y refrigeración por absorción (Cengel, 2012).

Los seres humanos necesitan sentirse cómodos, quieren vivir en un ambiente que no sea ni caliente ni frío, ni muy húmedo ni muy seco. Para alcanzar este confort térmico es necesario luchar constantemente contra los factores que causan descontento, como temperaturas mayores o menores y humedades, altas o bajas. El cuerpo humano puede verse como una máquina térmica cuya entrada de energía es el alimento y necesita disipar el calor en exceso. Para un adulto promedio, se necesitan disipar 87 W cuando duerme, 115 W cuando descansa o realiza trabajo de oficina o 440 W cuando realiza trabajo físico intenso (Cengel, 2012). La sensación de comodidad depende del exceso o falta de disipación de calor al ambiente. En ambientes fríos el cuerpo tiende a disipar más energía al ambiente de la que genera y el cuerpo recurre a bajar la temperatura de la piel y esto causa molestias. De manera contraria en ambientes cálidos el cuerpo no es capaz de disipar el calor que genera y se comienza a calentar de más y esto genera molestia. Para contrarrestar esto el cuerpo recurre a la sudoración en la cual se utiliza el calor latente de vaporización del agua para reducir la temperatura del cuerpo.

Para enfriar o calentar algo (transferir calor) existe una resistencia, un requerimiento de energía para cambiar la temperatura del objeto. A dicho requerimiento se le conoce como capacidad calorífica. Por ejemplo, para calentar 1 gramo de agua 1°C se necesita una caloría (ahí el origen de la unidad), para realizar lo mismo con hierro serían $0.12 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ y para el aire son $0.24 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$. A la transferencia de energía por diferencia de temperaturas se le conoce como calor sensible. Como se mencionó antes, el cuerpo humano utiliza el calor latente de la vaporización del sudor para regular su temperatura. El agua tiene la propiedad de tener un calor latente de vaporización muy alto, 1000 calorías por gramo de agua evaporado. Es decir, si se evapora un gramo de agua puedes enfriar un litro completo de ésta, 8 kg de hierro o 4 kg de aire. Dicha propiedad del agua no es ignorada en la ingeniería, la usan para enfriar reactores nucleares, ni en el tema de aires acondicionados, existen varios modelos de climatizadores evaporativos, pero debido a la robustez, a la facilidad de control y la aparente disponibilidad de recursos del siglo pasado, los enfriadores de compresión de vapor se volvieron más populares.

Enfriar evaporando agua tiene sus límites, el aire llega un punto en el cual no puede evaporar más agua (se satura) y la evaporación deja de ocurrir. Para medir qué tan lejos está el aire de saturarse de agua se utiliza la humedad relativa, término utilizado en informes climatológicos.

En resumen, la climatización evaporativa sirve para enfriar el aire hasta su temperatura de bulbo húmedo. Es decir, la temperatura ~~de bulbo húmedo está~~ relacionada con la humedad del aire y que siempre es más baja que la temperatura de bulbo seco; el qué tan más baja depende de la humedad del aire. Un aire muy seco tiene una temperatura de bulbo húmedo muy baja y un aire casi saturado tiene casi la misma temperatura de bulbo seco al húmedo. La relación temperatura de

bulbo húmedo, bulbo seco y humedad relativa se puede leer en una carta psicométrica.

Técnica

La saturación de agua en el aire produce enfriamiento. Para lograr dicho proceso es necesario que haya suficiente contacto en el agua y el aire para que se lleve a cabo la transferencia de masa. Para lograr esto se utilizan lechos empacados, los cuales son tubos o placas cargadas con un material que aumente la superficie de contacto. En este caso se utilizarán y compararán empaques fáciles de conseguir, que aunque los empaques comerciales los superen en muchas propiedades mecánicas, se desea utilizar material de preferencia reciclable. Algunos ejemplos de posibles empaques son vidrio triturado, grava, paja o tezontle, este último es poroso y es posible que ayude en el proceso.

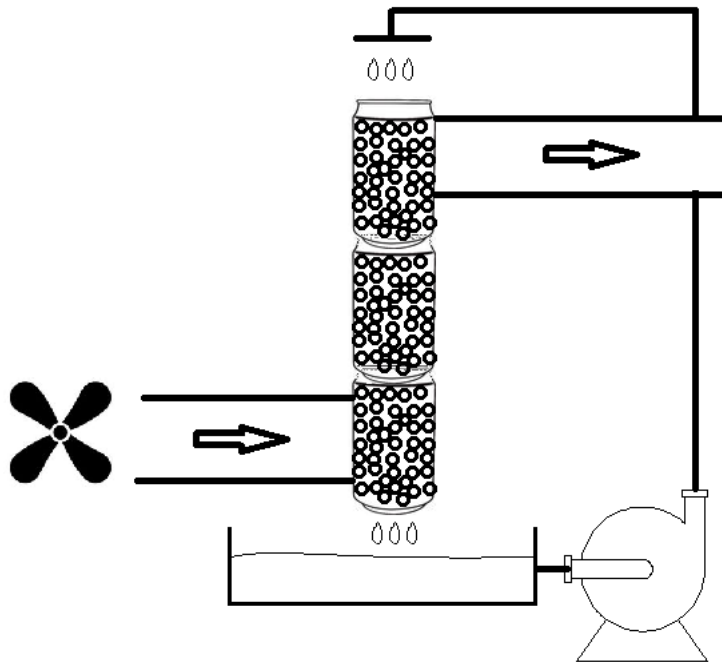


Figura 1 Representación del prototipo

Idealmente el líquido se debe distribuir por toda la superficie del empaque formando una pequeña película, pero en la realidad suelen haber canalizaciones, es decir que el agua se acumula en ciertas zonas formando canales y no se distribuye en la columna uniformemente disminuyendo su eficiencia. Además en los lechos empacados existe un factor significativo de pérdida de presión del aire debido a la obstrucción del mismo empaque, esto puede generar que se necesiten ventiladores más grandes o chicos para cada empaque (McGabe, 2007) (No es igual de fácil soplar en un popote hueco que en uno lleno de dulces de bolitas)

Procedimiento de trabajo

Basado en observaciones del enfriador anterior (Navarro et. al., 2015), se planteó que enfría debido al área de contacto de las camisas mojadas alrededor de las latas mediante la evaporación de agua (ver figura 2). Se planteó que usando relleno en las latas iba a ser mayor la eficiencia de enfriamiento por unidad de volumen debido a la mayor área de contacto. El trabajo inicial fue mediante experimentación decidir qué relleno se iba a utilizar. Existen empaques industriales de alta eficiencia (anillos, rashing, monturas berl, etc.) pero éstos tienen un precio alto monetario y ambiental. Los materiales a considerad para el relleno se eligieron para que cumplan las siguientes características:

- Bajo costo monetario
- Fácil de obtener
- Bajo impacto ambiental
- Funcionabilidad

Se fueron sugiriendo materiales que cumplieran lo más posible con las características anteriores. Algunas de las sugerencias fueron:

- Tezontle cribado a 3/8", 1/4" o 5/8"
- Grava cribada a 3/8", 1/4" o 5/8"
- Vidrio molido
- Padecería de barro
- Fibra henequén (Iztle)
- Bagazo de agave

Una vez seleccionado el empaque (relleno) óptimo, se procedió al armado de un prototipo, una vez armado el prototipo se procedió a la medición se su eficiencia para enfriar aire y su optimización. Finalmente se probó su capacidad para enfriar espacios de diferentes tamaños.

Materiales y Métodos

Como se menciona anteriormente se realizaron tres mediciones diferentes:

- Determinación del mejor relleno
- Medición de eficacia del prototipo y optimización
- Medición de capacidad para enfriar espacios

Se describirá el procedimiento experimental por separado para cada etapa



Figura 2 Prototipo del proyecto anterior

Determinación del mejor relleno

Se realizaron pruebas de laboratorio al tezontle, a la grava, al vidrio molido y a la fibra de henequén. La grava, el vidrio molido y el tezontle se cribaron con tamices de laboratorio con mallas de 1/4, 3/8 y 1/8 de pulgada. Se planteó determinar el diámetro de partícula (malla) óptima y el material óptimo, pero al probar el henequén se abandonó el planteamiento. Las pruebas se realizaron con vidrio, grava y tezontle cribado a 3/8 de pulgada de malla.

Para determinar el mejor empaque el procedimiento experimental consistió en rellenar una columna de acrílico de 2 pulgadas de diámetro por 30 cm de alto con el material a probar. A la columna se le hizo pasar un flujo de agua de 20 mL/min de arriba hacia abajo el cual fue determinado a prueba y error mediante pruebas previas. Con el flujo de agua constante se hizo pasar aire a contra corriente (de abajo hacia arriba) utilizando el compresor de laboratorio. Utilizando una placa de orificio con una válvula se midió y reguló el flujo de aire. Se muestra una fotografía y un diagrama del sistema experimental:

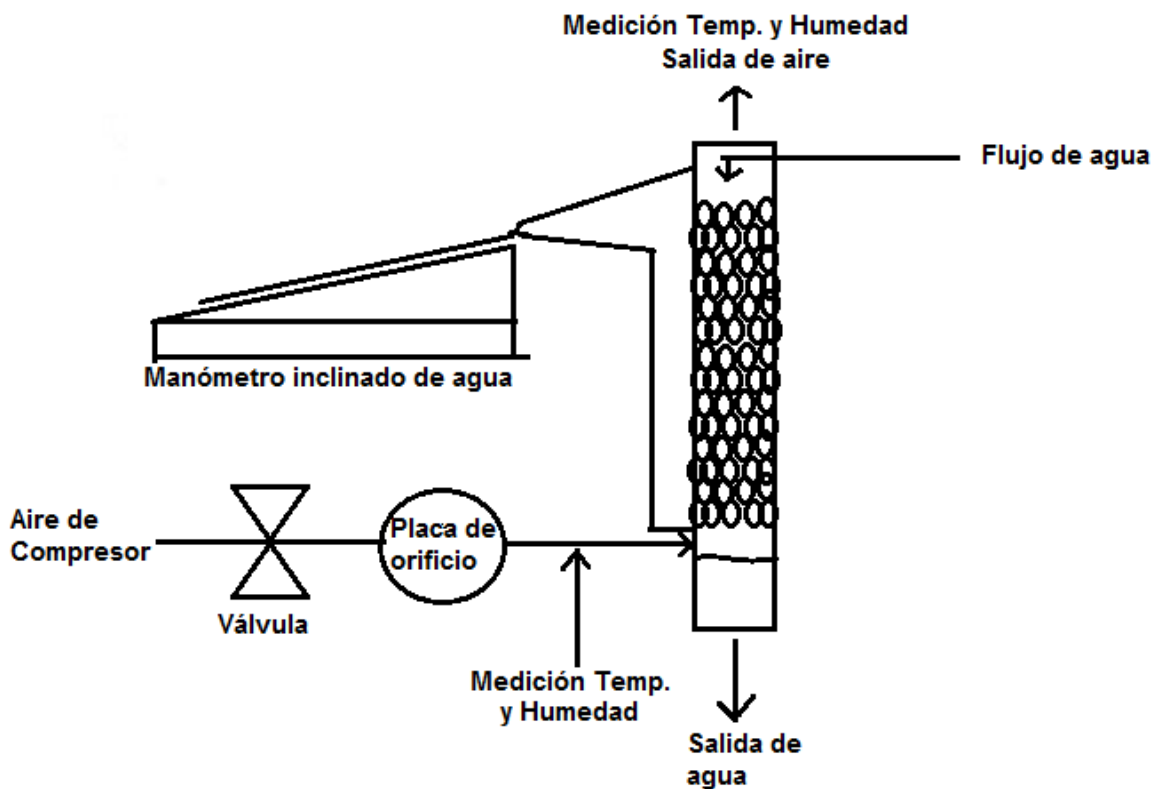


Figura 3 Diagrama del procedimiento experimental



Figura 4 Fotografía del montaje experimental

Con el flujo de agua constante se determinó el flujo de aire de inundación variando éste lentamente. Una vez determinado el flujo de inundación se apagó el sistema y se dejó éste reposar un tiempo. Después de reposar el sistema se arrancó de nuevo utilizando el mismo flujo de agua y el flujo de aire al 60% del flujo de inundación determinado anteriormente. Se realizaron las pruebas para cada material utilizando el 60% del flujo de inundación. Se midieron temperaturas y humedades de entrada y de salida y caída de presión utilizando un manómetro de agua inclinado a 15° .

Las mediciones de temperatura y humedad se realizaron con un termo hidrómetro Hextech® RH101 para mediciones de temperatura y humedad se esperó aproximadamente un minuto a que las lecturas se estabilizaran. A la placa de orificio se le midió la caída de presión con un manómetro de mercurio, el flujo se convirtió a presión con una curva de calibración proporcionada por el laboratorio de ITESO.

Medición de eficacia del prototipo y optimización

Una vez seleccionado el material, se procedió a la creación de un nuevo prototipo. Se muestran imágenes de los prototipos sugeridos a lo largo del proyecto:

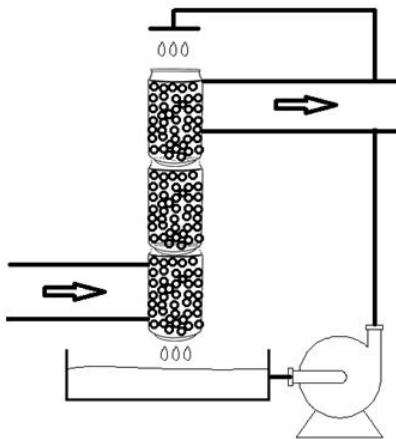


Figura 5 Primera idea de prototipo



Figura 6 Segunda idea de prototipo



Figura 7 Tercera idea de prototipo

La tercera idea de prototipo fue la que se eligió para su construcción y las pruebas se le realizaron a este equipo. Debido a su buena funcionalidad y poca disponibilidad de tiempo, se omitió la construcción de los demás prototipos.

La fibra de henequén forma una esponja, “estropajo” que es muy compresible y expansible. Para optimizar la densidad de relleno se realizaron mediciones al prototipo cargándolo con diferentes cantidades de fibra de henequén seca. Se planteó realizar 6 corridas cargando el prototipo con cantidades de 70, 140, 210, 280, 350 y 420 g de fibra. A partir de los 280 g el equipo dejó de expulsar aire. Se midieron temperatura y humedad del ambiente y de salida del equipo, Velocidad del aire de salida y a partir de eso se calculó una diferencia de temperatura y una diferencia de humedad. Las mediciones se realizaron a los 3, 15 y 30 minutos de tener al equipo funcionando.

Las mediciones de temperatura y humedad se obtuvieron con un termo hidrómetro Extech® RH101, la medición de velocidad se midió con un anemómetro Extech® Hot Wire Thermo-Anemometer. Para todas las mediciones de temperatura y humedad se esperó alrededor de un minuto a que las lecturas se estabilizaran.

Medición de capacidad para enfriar espacios

Observando las gráficas se seleccionó la cantidad de 150 g de empaque como la óptima y se cargó al prototipo. Se puso a funcionar el prototipo en una oficina de $x \text{ m}^3$, en una bodega de 4.92 m^3 y en otra oficina de 26 m^3 . Se monitoreó la temperatura y humedad del cuarto a lo largo del tiempo para la oficina de $x \text{ m}^3$ con el termo hidrómetro EXtech® RH101. En la bodega de 5 m^3 y la oficina de 26 m^3 se monitoreó la temperatura fuera del cuarto, dentro del cuarto, la de adentro de la cubeta (Temperatura bulbo húmedo) y la de la salida del aire. Se utilizaron

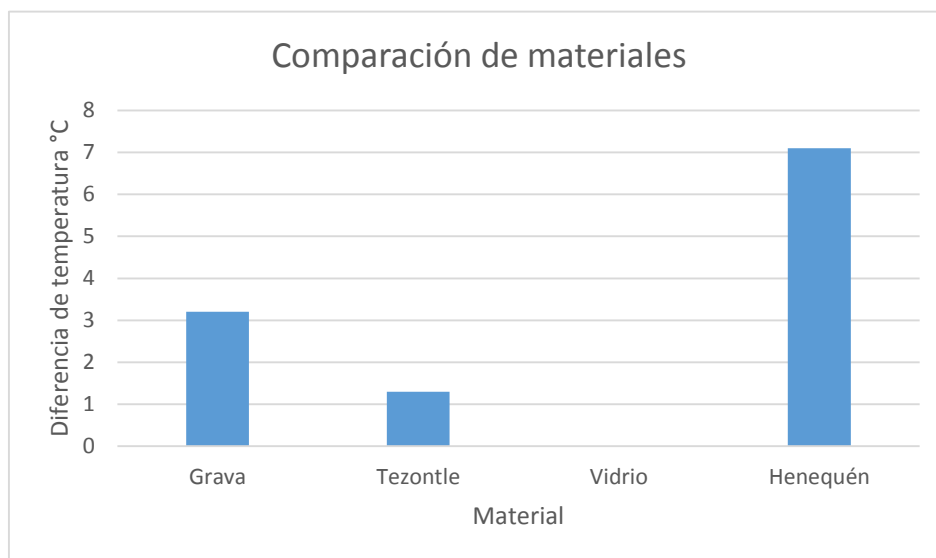
termopares tipo T para la medición de temperaturas y para registrar los datos un registrador Measurement Computing® USB-5105.

Resultados

Determinación del mejor relleno

Se muestran gráficas y tablas con los resultados:

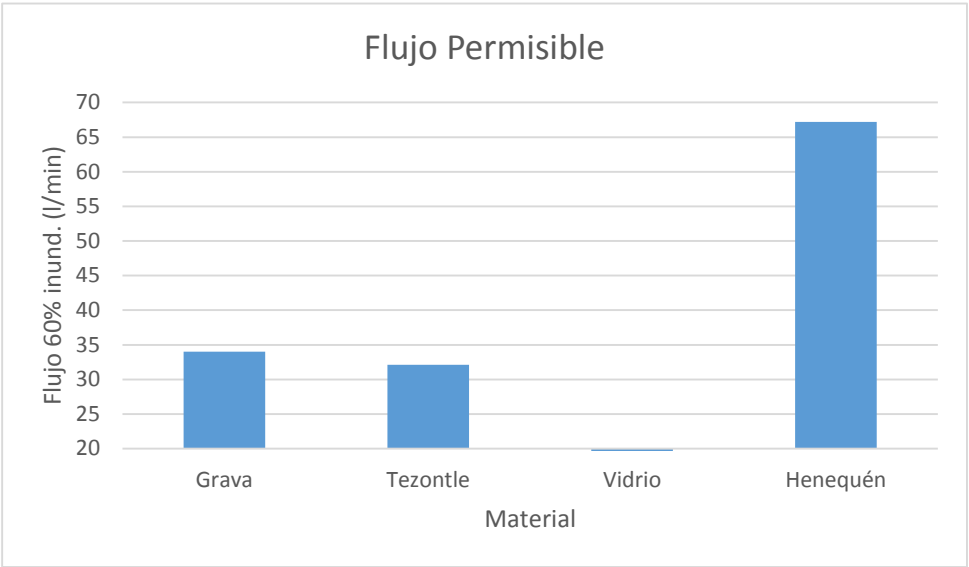
	Grava	Tezontle	Vidrio	Henequén
T entrada	22	20.8	--	21.9
T salida	18.8	19.5	--	14.8
Diferencia	3.2	1.3	--	7.1
Tabla 1. Mediciones de temperatura a empaques				



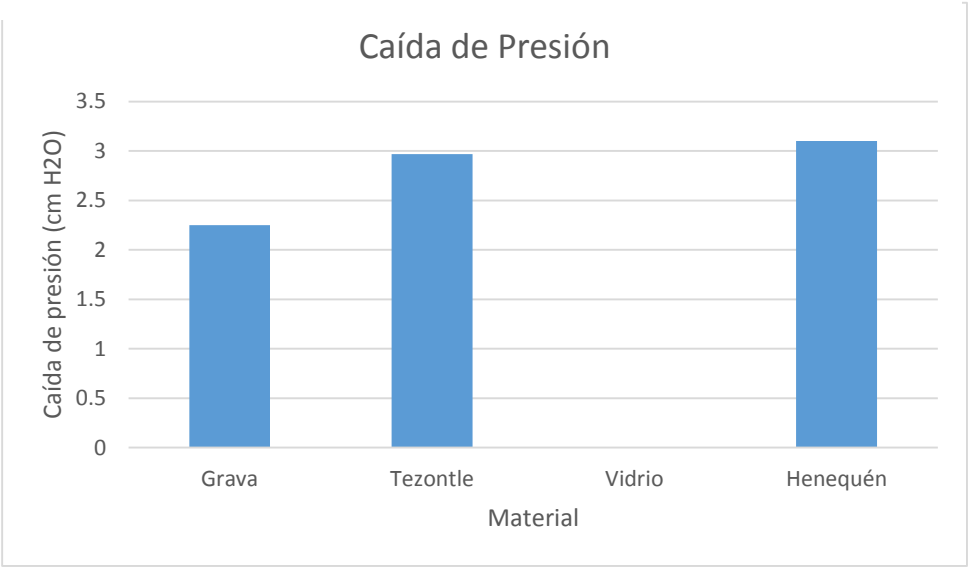
Gráfica 2 Diferencia de temperatura para diferentes empaques

	Grava	Tezontle	Vidrio	Henequén
Flujo permisible	34 l/min	32.1 l/min	0	67.2 l/min
Caída presión	2.25 cm h2o	2.97 cm h2o	0	3.1 cm h2o
H entrada	23%	23%	0%	23%
H salida	87%	85%	0%	84%

Diferencia	64%	62%	0%	61%
Tabla 2. Mediciones de flujo, caída de presión y humedad				



Gráfica 3 Flujos a 60 % de inundación



Gráfica 4 Caídas de presión a 60% de inundación

No se necesitaron completar las pruebas con los cribados a diferentes mallas de los materiales al observar que la fibra de henequén tiene propiedades de enfriamiento muy superiores a los otros materiales. El vidrio estaba demasiado compacto y el aire no fluyó a través de la columna por lo que todas las mediciones dieron cero. El henequén se eligió debido a que baja el doble de temperatura que la grava y el tezontle, tiene el doble de flujo permisible y es fácil de obtener (no necesita cribarse).

Construcción del prototipo

El prototipo consiste en una cubeta estándar de pintura de 20 litros a la cual se le hicieron perforaciones rectangulares de 8x5cm. A la tapadera se le cortó toda la parte central. En el fondo se le instaló una bomba Resun® SP-850 la bomba se conectó al dispersor utilizando manguera de hule de laboratorio. El dispersor consiste en una manguera de x de diámetro doblada en espiral con perforaciones de 0.25 pulgadas cada 5 cm, el extremo de la manguera se selló con silicona. Se muestra en la fotografía el dispersor:



Figura 9 Dispersor del prototipo



Figura 8 Prototipo

El dispersor se mantiene a un nivel utilizando hilo. El ventilador se coloca sobre la tapadera de la cubeta. El ventilador utilizado fue Merry Tech® 3336 de 42W. Los cables de electricidad se salen por uno de las perforaciones para que entre el aire.

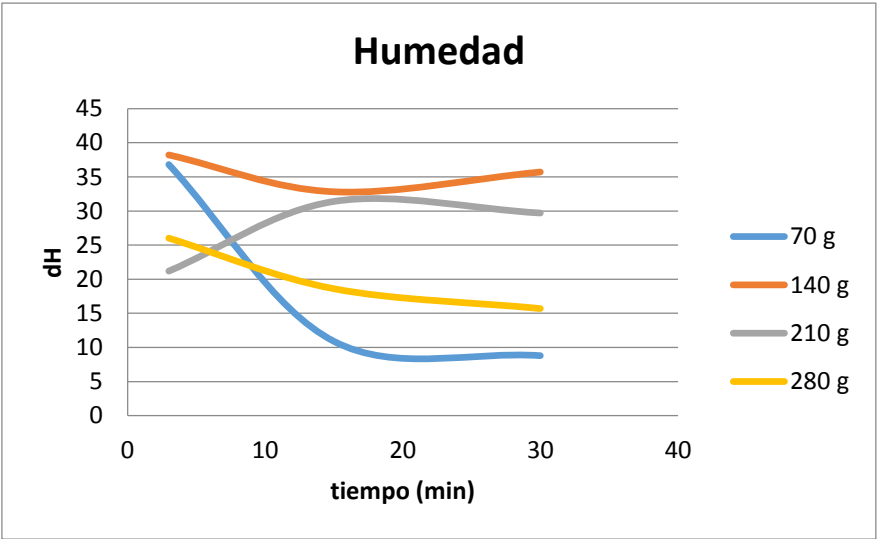
Medición de eficacia del prototipo y optimización

Se midieron temperatura y humedad del ambiente (T0 y H0) y de salida del equipo (Tf y Hf), Velocidad del aire de salida (V) y a partir de eso se calculó una diferencia de temperatura y una diferencia de humedad (dT y dH). Se muestra una tabla con los resultados:

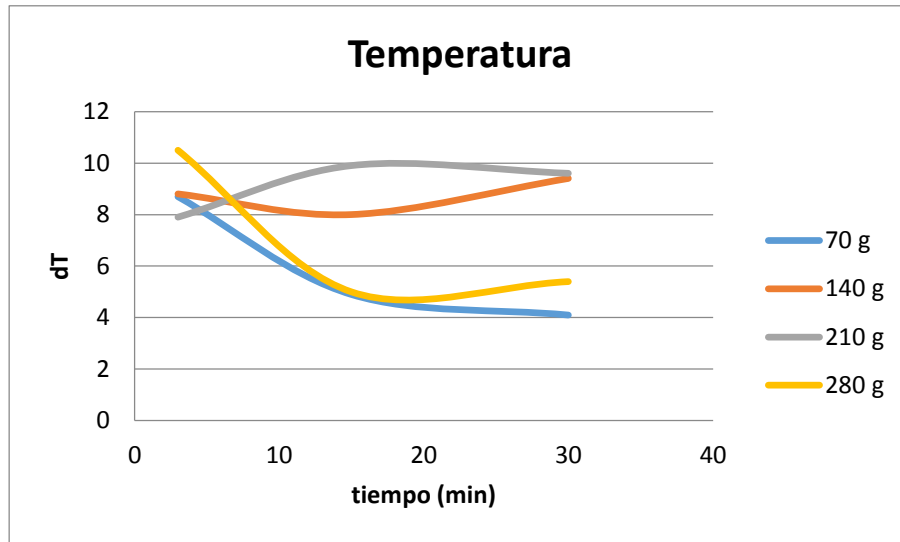
peso (g)	tiempo	T0	H0	Tf	Hf	Tw	V	dT	dH
70	3	25.2	21.2	16.5	58	21	4.2	8.7	36.8
	15	25.6	21.9	20.7	32.8	16	4.9	4.9	10.9
	30	24.9	22.6	20.8	31.4	15	4.8	4.1	8.8

140	3	25.2	22.8	16.4	61	21	4.4	8.8	38.2
	15	26.7	18.2	18.7	51	14	4.1	8	32.8
	30	27.2	17.3	17.8	53	15	4	9.4	35.7
210	3	28.4	18.8	20.5	40	18	3.7	7.9	21.2
	15	29.7	16.6	19.8	48	14	3.8	9.9	31.4
	30	27.2	17.3	17.6	47	12	3.30	9.6	29.7
280	3	29.8	19	19.3	45	20	3.20	10.5	26
	15	25.5	19.4	20.5	38	14	0.8	5	18.6
	30	26	19.3	20.6	35	14	0.8	5.4	15.7
350	3	27.3	18.7	24.5	30	17	0		
Tabla 3. Mediciones de eficacia del prototipo para optimización									

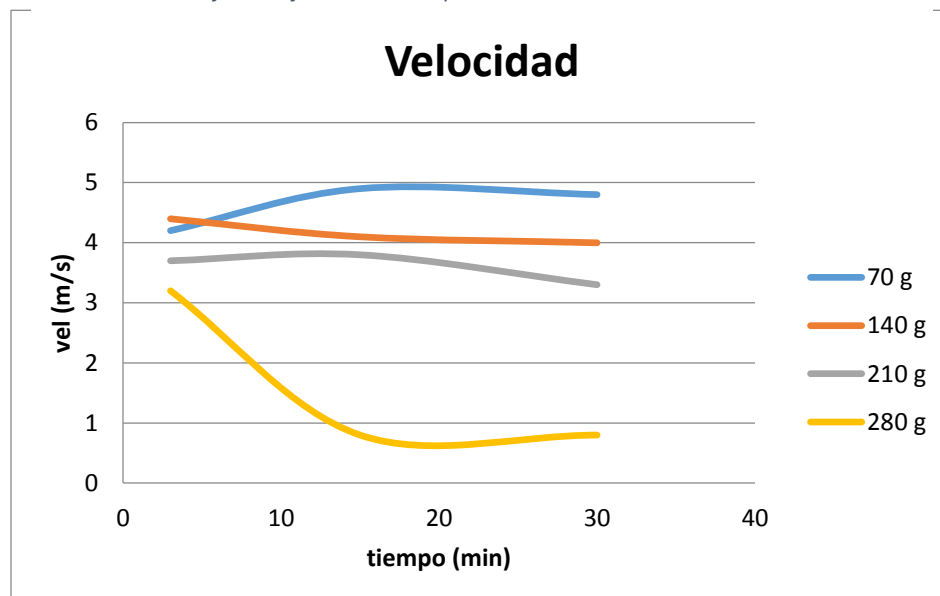
Se muestran gráficas para una representación más visual:



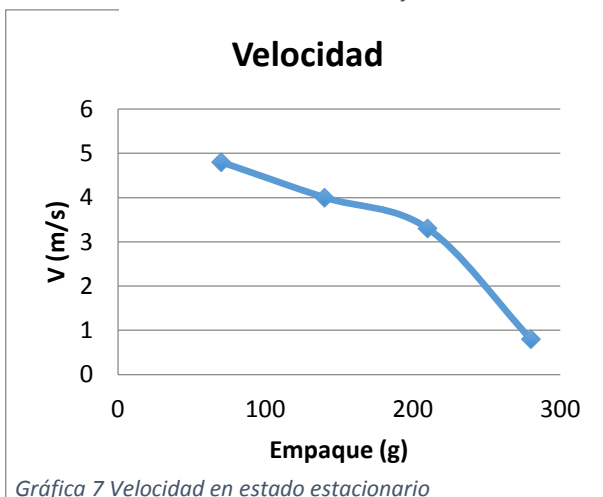
Gráfica 5 Diferencia de humedad e estado no estacionario



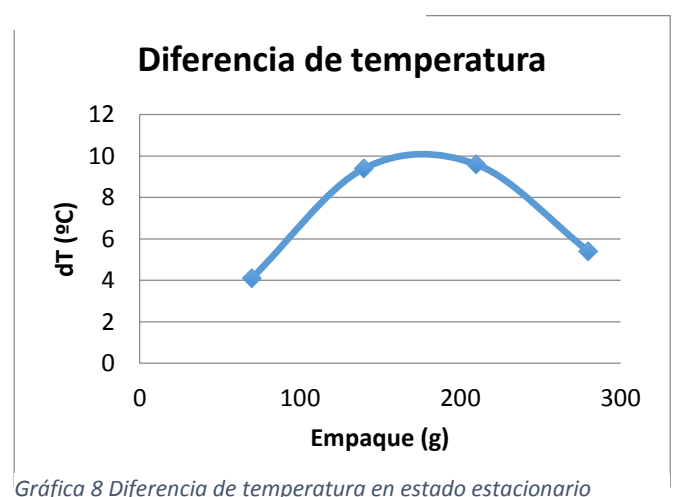
Gráfica 6 Diferencia de temperatura en estado no estacionario



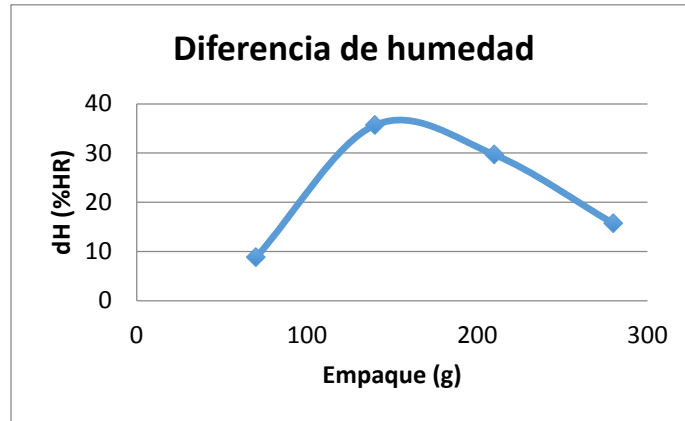
Gráfica 9 Velocidad en estado no estacionario



Gráfica 7 Velocidad en estado estacionario



Gráfica 8 Diferencia de temperatura en estado estacionario



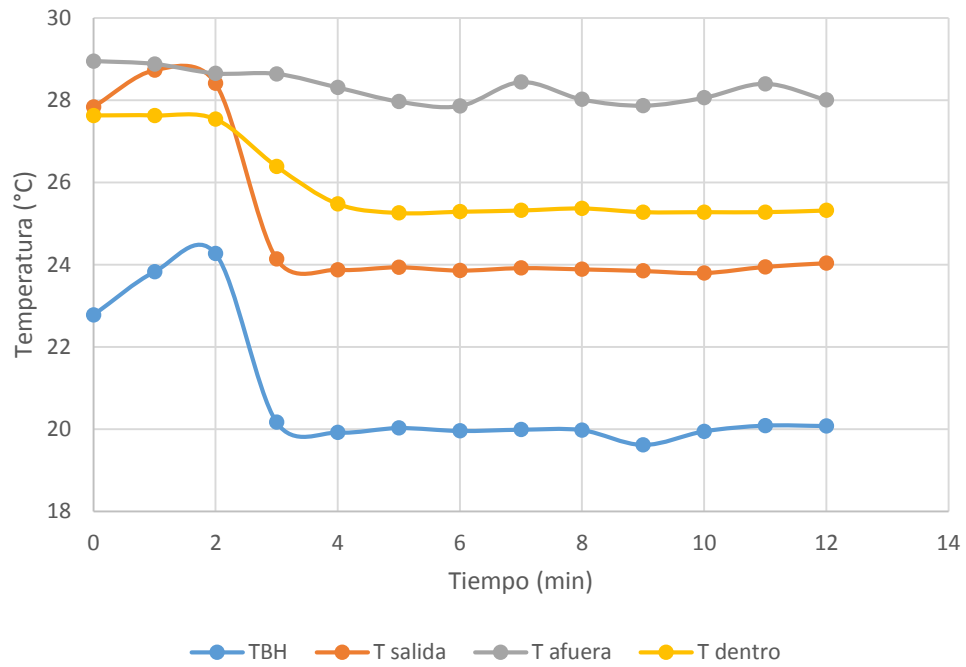
Gráfica 10 diferencia de humedad en estado estacionario

Se midieron las propiedades a lo largo del tiempo para observar cuánto tiempo tarde el sistema en estabilizarse. Las mediciones de 70 g y 280 g varían a lo largo del tiempo disminuyendo su eficacia para enfriar aire y las mediciones de 140 g y 210 g se mantienen relativamente constantes a lo largo del tiempo. Observando las gráficas de diferencia de temperatura y diferencia de humedad se puede ver que la cantidad óptima a cargar se encuentra entre los 140 g y los 210 g. La velocidad de flujo varía de forma lineal con la cantidad de empaque cargado.

Medición de capacidad para enfriar espacios

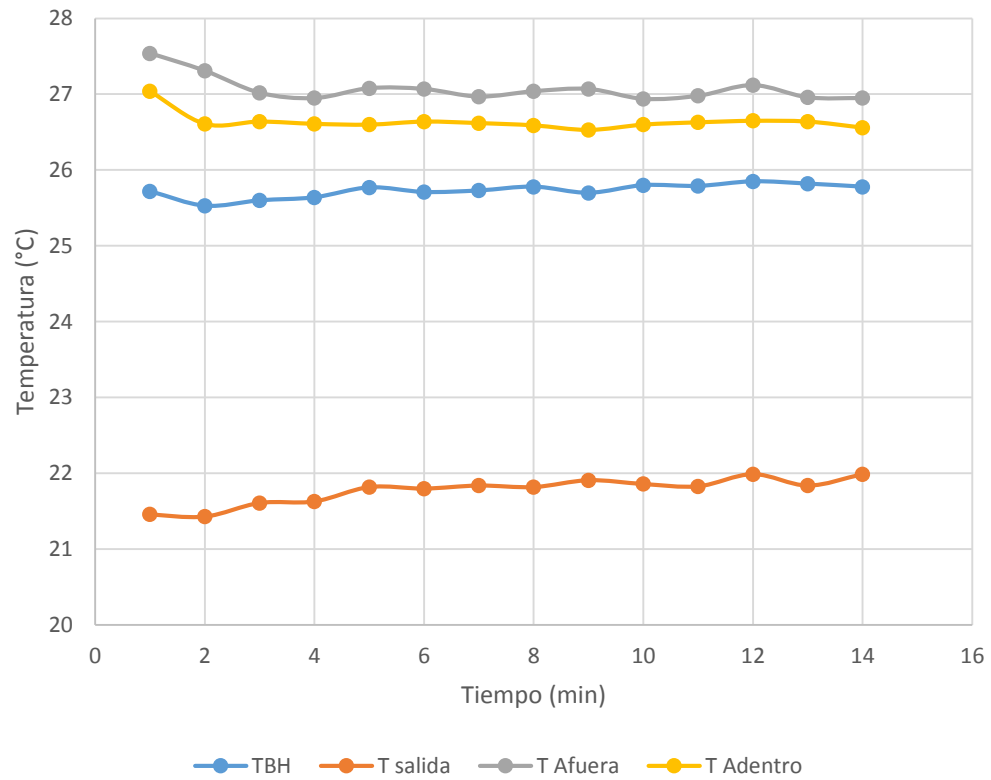
Observando las gráficas anteriores se seleccionó la cantidad de 150 g de empaque como la óptima y se cargó al prototipo. Se puso a funcionar el prototipo en una oficina de 21.4 m³, en una bodega de 4.92 m³ y en otra oficina de 26 m³. Se monitoreó la temperatura a lo largo del tiempo. Se muestran gráficas y tablas con resultados:

Medición cuarto de 5 m3



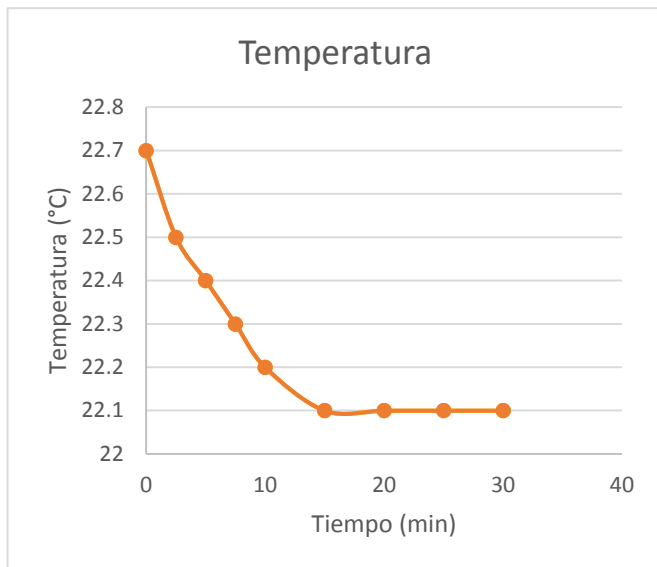
Gráfica 11 Temperatura a lo largo del tiempo

Medición Cuarto 26 m3

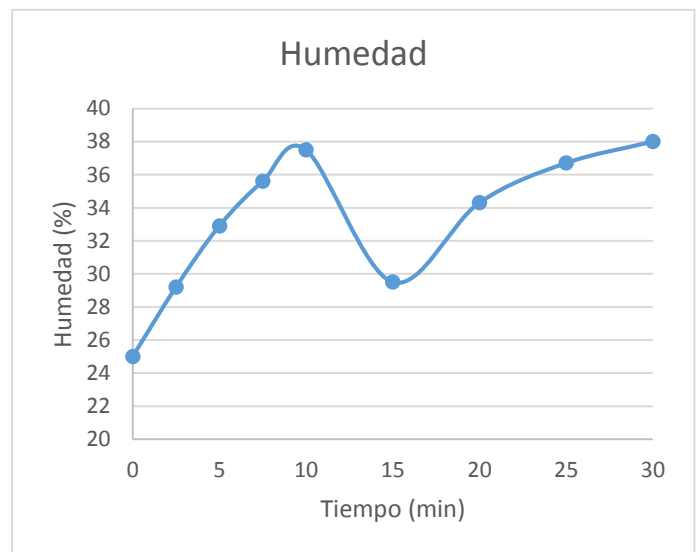


Gráfica 12 Temperatura a lo largo del tiempo

Se muestran las mediciones de temperatura y humedad para la oficina de 21.4 m³:



Gráfica 14 Temperatura a lo largo del tiempo



Gráfica 13 Humedad a lo largo del tiempo

Se observa que el cuarto de 5 m³ se enfrió de 27.6°C a 25.3°C el de 21.4 m³ desde 22.7°C a 22.1°C y el de 26 m³ desde 27.0°C a 26.4°C. La temperatura exterior en los casos que se midió con cambió con respecto al tiempo.

Conclusión

Juntando lo observado en las mediciones de los tres procedimientos experimentales se puede afirmar que la fibra de henequén sirve como buen empaque para un sistema enfriador evaporativo casero. Las mediciones muestran un tope de diferencia de temperatura de 10°C (gráfica 6) utilizando este empaque. El prototipo aunque fue optimizado, no fue del todo funcional debido a que el cambio de temperatura que éste puede cambiar en un cuarto es significativo cuando el cuarto mide apenas 5 m³. Como trabajo futuro se podría intentar realizar mediciones de enfriamiento de un cuarto utilizando dos o más de estos prototipos funcionando en paralelo. También es importante mencionar que es posible que la eficiencia y la eficacia del prototipo son muy probables de aumentar utilizando un ventilador más potente/grande.

Referencias

Secretaría de Energía. (2011). Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 Sectores, 5 Retos. Febrero 2016, de SENER Sitio web: http://www.energia.gob.mx/taller/res/1858/iee_mexico.pdf

Warren L. McGabe, Julian C. Smith, Peter Harriot. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. México: McGraw Hill.

Cengel Junes A. (2012). Termodinámica. México: McGraw Hill.

Bader T. (Octubre 2014). Solar desiccant evaporative cooling with multivalent use of solar thermal heat. Institute of Energy and Sustainable Development. Febrero 2016, De EBSCO HOST Base de datos.

Navarro C.A., Radjev K.E., et. Al. (2015). Prototipo de enfriamiento ecológico para espacios interiores. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Proyecto de Aplicación Profesional. México.