

## Confort térmico en una habitación de adobe con sistema de almacenamiento de calor en los andes del Perú

Thermal comfort in an adobe room with heat storage system in the andes of Peru

Antonio Holguino Huarza<sup>1\*</sup>, Luis Olivera Marocho<sup>2</sup> & Katterine Ursula Escobar Copa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento Académico de Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú

<sup>2</sup>Departamento Académico de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez Juliaca Puno Perú

\*Autor para correspondencia, e-mail: aholguino1@hotmail.com

### ARTÍCULO ORIGINAL

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido 21-06-2017

Aceptado 10-06-2018

On line: 27-07-2018

#### PALABRAS CLAVES:

*Acumulador térmico,  
calor específico,  
conductividad térmica,  
habitación con confort  
térmico y materiales de  
construcción de adobe.*

### ORIGINAL ARTICLE

#### ARTICLE INFORMATION

Received 21-06-2017

Accepted 10-06-2018

On line: 27-07-2018

#### KEYWORDS:

*Thermal accumulator,  
specific heat,  
thermal conductivity,  
room with thermal comfort and  
adobe building materials.*

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la evaluación del confort térmico al interior de la habitación de prueba (HP) de adobe y materiales de la zona alto andina del Perú, como la piedra andesita que es un acumulador de calor. Esta investigación experimental, determinó los valores de la conductividad térmica 0,176 0,149 y 0,118 W/mK para el adobe, yeso y paja. Se efectuó una comparación entre los valores de la conductividad térmica y calor específico, obtenido experimentalmente para los materiales y sistemas utilizados en la construcción de HP con los valores conocidos de materiales específicos como el agua y el aire. El diseño y uso de los materiales en la construcción de la pared, puerta y ventana, permitieron determinar los valores de las conductividades térmicas iguales a 0,061 0,030 y 0,027 W/mK respectivamente, que son similares a la conductividad térmica de un aislante térmico natural como el aire cuyo valor es 0,026 W/mK. La transferencia de energía calorífica hacia el exterior de la HP, durante 11 horas nocturnas es 0,815 MJ. El acumulador de energía instalado en la HP construido con piedra, guano y madera cuyos valores del calor específico fueron 1235,13 2416,44 y 2212,77 J/kgK respectivamente; comparada con la del agua que es un buen almacenador de energía, representan 29,55; 57,81 y 52,94 % respectivamente. El sistema acumulador de HP almacena energía calorífica equivalente a 8,305 MJ, el excedente de energía calorífica permite que la temperatura al interior de HP durante las épocas de invierno tenga valores medio mayores en 63,83 y 68,83 % a las temperaturas medias de HC y MAC respectivamente.

### ABSTRACT

The objective of this work was the evaluation of thermal comfort inside the test room (HP), of adobe and materials of the high Andean area of Peru, like the andesite stone that is a heat accumulator. This experimental research work determined the values of thermal conductivity 0,176 0,149 and 0,118 W / mK for the adobe, plaster and straw. It was made a comparison was made between the values of thermal conductivity and specific heat, obtained experimentally for the materials and systems used in the construction of HP with the known values of specific materials such as water and air. The design and use of the materials in the construction of the wall, door and window, allowed to determine the values of the thermal conductivities equal to 0,061 0,030 and 0,027 W / mK respectively, that are similar to the thermal conductivity of a natural thermal insulator such as air whose value is 0.026 W / mK. The transfer of heat energy to the outside of the HP, during 11 hours at night is 0,815 MJ. The energy accumulator installed in the HP built with stone, guano and wood whose specific heat values were 1235,13 2416,44 and 2212,77 J / kgK respectively compared with the water, that is a good energy storage, that represent 29,55 57,81 and 52,94% respectively. The HP storage system stores heat energy equivalent to 8,305 MJ, the surplus of heat energy allows that temperature inside HP during the winter times to have average values higher in 63, 83 and 68, 83% at the average temperatures of HC and MAC respectively.

## INTRODUCCIÓN

En las estaciones de invierno, los fenómenos climatológicos que afectan la zona sur alto andina, en las Regiones de Puno, Arequipa y Cusco, hacen que las bajas temperaturas en las noches al interior de las habitaciones descienda próximos o inferiores al punto de congelación del agua, siendo esta un problema que afecta a la salud, bienestar y satisfacción de los moradores, trayendo consigo diversos perjuicios principalmente a la salud que afectan a poblaciones más vulnerables entre niños y adultos mayores (Abanto et al., 2017).

La conductividad térmica y calor específico de adobe y ladrillo, hecha de una mezcla de arcilla y paja medida por una técnica de la sonda térmica, determinaron que el adobe con paja y el ladrillo tienen conductividad térmica menos de  $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Estos ladrillos utilizados, cuyas dimensiones nominales fueron 240 mm, 115 mm y 113 mm, que han sido utilizados para la construcción de los muros de tierra cumpliendo con los reglamentos de construcción de Reino Unido, siendo su conductividad térmica y calor específico de adobe con paja iguales a  $0,18 \text{ W/mK}$  y  $900 \text{ J/kgK}$  respectivamente, mientras para ladrillo  $0,24 \text{ W/mK}$  y  $750 \text{ J/kgK}$  (Goodhew y Griffiths, 2005). El adobe es un material termorregulador que calienta en invierno y enfría en verano; para comprobar esto, han sido construidos dos módulos semejantes hechos de adobe y bloqueta, registrándose que la temperatura exterior de  $98^\circ \text{ F}$ , la temperatura interior de los módulos de adobe y bloqueta fueron de  $90$  y  $103^\circ \text{ F}$  respectivamente. El material del cual se elaboró el adobe era parte de un suelo y los adobes fueron sujetos a la dinámica de la temperatura del suelo (Morony, 2004). Según Johansson *et al*, (2006), el mal uso de los materiales de construcción origina problemas ambientales, el medio ambiente exterior se está deteriorando en muchas ciudades tropicales debido a la rápida urbanización. Las construcciones de adobe tienen mayor sostenibilidad por poseer cualidades térmicas, propiedades acústicas e impacto ambiental (Minke, 2006). Las normas deben de

establecer que los adobes sean hechas de tierras que no contenga demasiada arena (Daudon *et al.*, 2014). El suelo utilizado en la construcción de adobe consiste solo en partículas minerales que incluyen arcillas, limos y material arenoso, que se mezclan en proporciones variables para mejorar su comportamiento mecánico o físico (Pacheco-Torgal, et al., 2012).

Es importante conocer la transferencia de calor a través de las paredes de un sistema para determinar la cantidad de energía que se conserva dentro del sistema (Carli et al., 2012). Utilizando dos tipos de ladrillo del mismo volumen y cuyos densidades fueron de  $650$  y  $750 \text{ kg/m}^3$  con los que se construyeron dos habitaciones y en diferentes lugares, estas variables permitieron medir la performance térmica del interior de la habitación construida (Almujahid, 2013). Cagnon et al, (2017), encontró valores de conductividad térmica similares a los valores de la regulación térmica francesa, que da referencia valores para arena ( $910$ - $1180 \text{ J/kg K}$ ) y arcilla ( $1670$ - $2500 \text{ J/kgK}$ ). Durante los últimos 20 años, muchas formas de volumen encapsulado de materiales de cambio de fase han sido promocionados para actividades y aplicaciones de almacenamiento de energía solar pasiva incluyendo la ganancia directa de estas energías (Khudhair et al., 2004). Con respecto al uso de barro Sharma et al, (2015) y Quagliarini *et al*, (2015) afirman que los ladrillos y adobes hechos de barro se utilizan como material de construcción en todo el mundo, especialmente en los países en desarrollo, siendo estas asequibles, respetuosos con el medio ambiente y están disponibles en abundancia.

El objetivo de la investigación fue evaluar el confort térmico al interior de la HP que ha sido construida con materiales de construcción que existen como materia prima en las zonas alto andinas del Perú, apoyándose en los resultados de investigaciones similares referentes a la evaluación de las propiedades termofísicas de los materiales relacionadas con la variación de las temperaturas al interior de recintos construidas con estos materiales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar las propiedades termo físicas de los materiales que se utilizó en la construcción de la HP tales como adobe (97,7 % de tierra arcillosa con 2,3 % de paja), yeso, y madera, elaborándose muestras de dimensión  $12 \times 12 \times 1,8 \text{ cm}^3$  para cada material, determinándose sus conductividades térmicas.

El procedimiento para determinar la conductividad térmica está basado en el proceso de conducción de calor establecido por la ley de Fourier, en donde los bloques sólidos de los materiales de construcción tienen un espesor  $h$ , cuyas superficies opuestas de magnitud  $A$  están a diferente temperatura de los focos caliente y fría  $T_c$  y  $T_f$  respectivamente. El vapor de agua a una temperatura  $T_c = 87^\circ\text{C}$  y el bloque de hielo a  $T_f = 0^\circ\text{C}$ , constituyen los focos caliente y frío respectivamente, que están en contacto con las caras opuestas de la muestra de los materiales de construcción.

### Conductividad térmica

La conductividad térmica de los materiales de construcción se determinó por mediciones indirectas utilizando el instrumento *Thermal Conductivity Apparatus* TD-8561: PASCO, midiéndose directamente a las variables  $\Delta m$  y  $\Delta t$  que representan a la cantidad de masa del hielo derretido y el tiempo transcurrido en el proceso respectivamente. La ecuación de transferencia de calor que representa al flujo de la cantidad de energía calorífica por unidad de tiempo está dado por

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = k A \frac{\Delta T}{h} \quad (1.1)$$

Siendo  $K$  la conductividad térmica, estableciendo una relación funcional entre las variables  $\Delta m$  y  $\Delta t$

$$\Delta m = \left( \frac{kA \Delta T}{hL} \right) \Delta t \quad (1.2)$$

La diferencia de temperaturas entre los puntos de ebullición y congelamiento del agua es  $\Delta T = 87,7^\circ\text{C}$ .

Según Young (2009) el calor latente de fusión del agua es  $L = 3,34 \times 10^5 \text{ J/kg}$ . El grosor de la muestra de cada material es  $h = 0,018 \text{ m}$ , la sección de área transversal del bloque de hielo es  $\Delta = 9,503 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  (figura 1).

Los valores de la conductividad térmica de los materiales de construcción utilizados (adobe, yeso, madera) se han determinado con el Análisis de Regresión Lincal (AERL) entre las variables  $\Delta m$  y  $\Delta t$  que representan a la masa de hielo fundido y el tiempo  $\Delta t$  respectivamente para cada muestra de los materiales utilizados. Para el AERL se utilizó el Programa Excel.



Figura 1. Muestra de los materiales de construcción. Puno, 2016.

### Calor específico

El principio físico que se utilizó para determinar el calor específico de los materiales es el principio de conservación de energía para un proceso de mezclado de sustancia dentro de un recinto adiabático; se ha utilizado al agua como la sustancia que transfiere energía calorífica a la muestra de materiales de construcción, en este balance energético se utilizó como el principio del equilibrio térmico. Durante el proceso, el agua y el recipiente que la contiene son sustancias que pierden energía calorífica y las que ganan esta energía son las muestras y el recipiente que la contiene. El calor específico del agua y del aluminio son conocidos e iguales a  $c_{H_2O} = 1,00 \frac{\text{cal}}{\text{gr}^\circ\text{K}}$ , y  $c_{Al} = 0,22 \frac{\text{cal}}{\text{gr}^\circ\text{K}}$

respectivamente (Young, 2009), el calor específico de la muestra

$$c_m = \left( \frac{m_{AlH_2O} c_{Al} + m_{H_2O} c_{H_2O}}{m_m} \right) \left( \frac{T_{eq} - T_{AlH_2O}}{T_{Al,m} - T_{eq}} \right) - \left( \frac{m_{Al,m}}{m_m} \right) c_{Al} \quad (1.3)$$

### Construcción de la habitación

Para efectuar una comparación del comportamiento térmico al interior de una habitación, se construyeron dos habitaciones, la HP y otra habitación de comparación (HC). Las paredes externas de HP están construidas con adobe, la separación de los tabiques de la pared interior y las estructuras del techo que están hechas con madera cuya área de la sección transversal es igual a  $6,0 \times 3,5 \text{ cm}^2$ . Mientras los durmientes del piso están hechas también con madera de área transversal  $6,5 \times 3,5 \text{ cm}^2$ .

Segun Neves (2011), el material utilizado para la construcción de la pared exterior de la HP, para la elaboración del adobe se ha determinado su composición granulométrica, separando en dos estratos, la arena o grava y la arcilla o limo.

#### a) Pared

La HP se edificó sobre una cimentación y solera de concreto, vaciada en el contorno con un ancho y altura de 18 y 10 cm respectivamente. Sobre la cimentación se levantó la pared exterior de adobe, con una altura de 1,4 m en la fachada frontal y de 1,7 m en la pared posterior, El adobe utilizado en la construcción de las paredes tienen dimensiones de largo, ancho y altura iguales a 21, 12 y 9 cm respectivamente; su masa media de cada bloque es 3,8 kg. En el interior de las paredes se colocó tabique de madera de 6 cm ancho, ocupado por aire sin movimiento convectivo. El diseño que representa a las dimensiones de la pared interior de la HP son: ancho, largo, vertical frontal y vertical posterior de 1,84; 1,94; 1,40 y 1,70 m respectivamente (Figura 2).

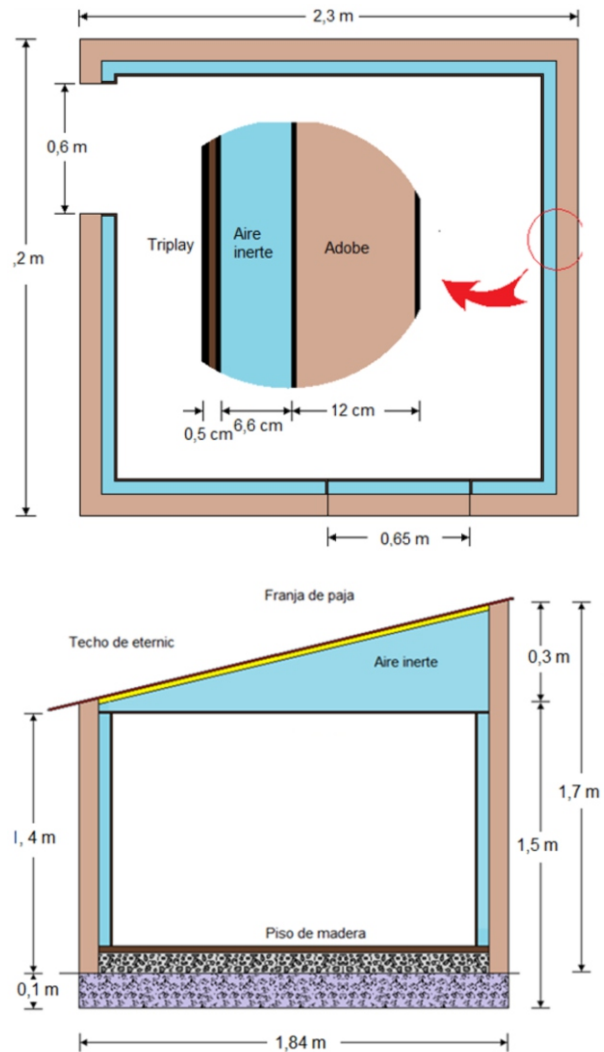


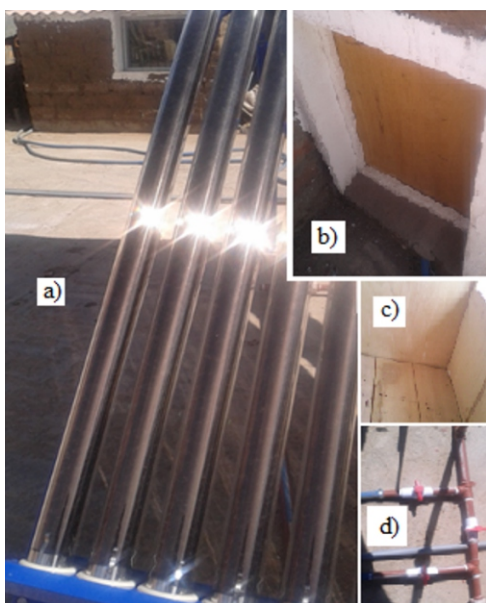
Figura 2. Diseño de la HP; a) Dimensionamiento de la cimentación y la pared, b) Corte de perfil. Puno, 2016.

#### b) Puerta y ventana

Para la correcta estimación del balance energético es importante considerar en las construcciones, la pérdida de energía a través de la ventana y la puerta. (Baldinelli et al., 2014). La puerta de la HP tiene 0,6 y 1,2 m de ancho y altura respectivamente; está hecha de dos placas de madera de 4,5 mm grosor, separado por 5,5 cm de aire en el intermedio entre las placas.

La ventana tiene 0,65 y 0,50 m de ancho y altura respectivamente, y acabado en yeso. En la ventana se coloca doble capa de vidrio simple de grosor 2,2 mm adherido con silicona, en la instalación se sellan con silicona todos los contornos de la ventana para que no exista movimiento de aire. La separación de las hojas

de vidrio tiene 8,0 cm de espaciamiento que es ocupada por aire sin movimiento.



**Figura 3.** Vista de la HP. a) Conexión de Sistema de Calentamiento Solar de Agua con SAEC, b) Puerta de la HP, c) Interior de la HP, d) llaves y tuberías de conducción de agua caliente. Puno, 2016.

### c) Techo

El techo de la HP está sostenida por armazones hechas con madera de 6x3,5 cm<sup>2</sup> de sección transversal, con cubierta interior de paja prensada de 1,0 cm de espesor y cubierta exterior de plancha de eternic. En el interior del techo también se colocó un tabique de triplay, consiguiendo que el cielo raso sea horizontal.

### Transferencia de calor

Con el uso de las baldosas con porosidad la temperatura en la interfaz decrece aproximadamente en un 15 °C (Michels *et al.*, 2008), las paredes hechas con materiales de cambio de fase son capaces de capturar grandes proporciones de la radiación de energía solar incidente en las paredes y techo de la construcción, estas también son capaces de minimizar los grandes flujos de temperatura con el medio ambiente (Khudhair *et al.*, 2004). El flujo de energía total es la acumulación de los flujos de energía en cada una de las partes de HP que están en contacto con el exterior o Medio Ambiente Circundante (MAC) a través de las paredes, puerta, ventana y techo dado por

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{paredes} + \dot{Q}_{puerta} + \dot{Q}_{ventana} + \dot{Q}_{techo} \quad (1.4)$$

### Sistema de acumulador de calor

El piso de la HP empieza desde el vaciado de 10 cm de concreto sobre tierra compactado. Sobre la capa de concreto se instaló el Sistema Acumulador de Energía Calorífica (SAEC) constituido por la mezcla de piedra andesita chancada y guano. Se han colocado durmientes de madera de una sección transversal de 6,5x3,5 cm<sup>2</sup>, sobre estas durmientes se instalaron tabloncillos de madera con 2 cm de grosor que constituyen el acabado final del piso de la HP con un área total de 3,6 m<sup>2</sup>.

El SAEC, está instalado por debajo del piso acabado de la HP, constituido por 47,5 kg de piedra andesita; 10,6 kg de guano seco; 8,6 kg de madera y 2,7 kg de agua. El intercambiador de energía calorífica es un serpentín de tubo de aluminio de 8,0 m de longitud lineal y 2,2 cm, de diámetro interior, los empalmes están hechos con mangueras y abrazaderas circulares. La instalación de los materiales del SAEC, se hizo sobre una capa de tecnopor con 1,0 cm de espesor sobre la losa de concreto (Figura 3). La capacidad calorífica total del sistema es la suma de las capacidades caloríficas de cada uno de los materiales que componen al SAEC

$$C_{SAEC} = C_{piedra} + C_{huano} + C_{madera} + C_{H_2O} \quad (1.5)$$

La capacidad de energía que almacena el SAEC es

$$Q = (C_{SAEC})\Delta T \quad (1.6)$$

La cantidad de energía calorífica acumulado en función del tiempo es

$$Q_{SAEC} = 143.33\Delta t \quad (1.7)$$

### Temperaturas de confort térmico

Las fechas en donde se han efectuados las mediciones directas de temperaturas, han sido elegidas para días de invierno. Esto días de mediciones corresponden a 21, 22 de mayo; 11, 12 de junio; 16, 17 de julio y 6, 7 de agosto del 2016. La adquisición de datos de temperatura se hicieron durante las 24 horas del día en

un intervalo de una hora, cada secuencia de toma de datos se inicia a las 12:00 h del sábado hasta 12:00 h del domingo, registrándose simultáneamente en el interior de la HP, HC y en el exterior o MAC. La investigación se hizo en un módulo construido en el centro poblado de Alto Puno que se ubica en las coordenadas  $15^{\circ}48'52,02''S$   $70^{\circ}01'54,52''O$  elevación 4005 m, cuyas características ambientales son las apropiadas a las habitaciones existentes en los sectores rurales de zonas alto andinas del sur del Perú.

## RESULTADOS

Los valores de la conductividad térmica de los materiales de construcción utilizados, tales como el adobe, yeso, madera (tabla 1), son similares a los valores de materiales aislantes como el aire y otros materiales de construcción de techos como el eternic.

**Tabla 1.** Conductividad térmica de los materiales de construcción

| Materiales de construcción | Conductividad térmica (W/mK) |
|----------------------------|------------------------------|
| Adobe (*)                  | 0,176                        |
| Madera (*)                 | 0,274                        |
| Aire (**)                  | 0,026                        |
| Yeso (*)                   | 0,149                        |
| Vidrio(**)                 | 0,84                         |
| Eternic (**)               | 0,36                         |

Elaboración propia (\*), (Young, 2009)(\*\*).

Con los valores obtenidos para la conductividad térmica de los materiales (tabla 1) y el diseño con las que se construyó la HP, se ha obtenido valores globales de los coeficientes de transferencia de calor y conductividad térmica de las partes o componentes de la HP (tabla 2).

**Tabla 2.** Coeficientes de transferencia de energía calorífica para las componentes de la HP. Puno, 2016

| Componentes de la HP | Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K) | Conductividad térmica (W/mK) |
|----------------------|---|------------------------------|
| Pared                | 0,333   | 0,061                        |
| Puerta               | 0,466   | 0,030                        |
| Ventana              | 0,324   | 0,027                        |
| Techo                | 0,243   | -                            |

Los datos registrados por el *Calorimeter* ET-8499, para cada muestra de los materiales, estos datos son la masa de las muestras y del agua, representados por  $m_m$  y  $m_{H_2O}$  respectivamente; la masa de los recipientes de aluminio que contienen a la muestra y al agua son representados por  $m_{Al,m}$  y  $m_{AL H_2O}$  respectivamente. El calor específico del agua y el aluminio, están representados por  $C_{H_2O}$  y  $C_{Al}$  respectivamente; así mismo las temperaturas iniciales de la muestra, del agua y del equilibrio térmico han sido representados por  $T_{Al}$ ,  $m$ ,  $T_{Al,H_2O}$  y  $Teq$  respectivamente.

Los materiales de construcción que alcanzan el equilibrio térmico a mayores temperaturas, tiene mayor calor específico, esta apreciación se verifica con los resultados de Young (2009) (tabla 3).

Es importante conocer la cantidad de masa de cada uno de los materiales utilizados para construir el SAEC, así como conocer su calor específico previamente calculados, con estos datos se determinó la cantidad de energía calorífica que puede acumular el SAEC.

**Tabla 3.** Calor específico de los materiales de construcción

| Materiales de construcción | Calor Especifico(J/kgK) |
|----------------------------|-------------------------|
| Piedra (*)                 | 1243,12                 |
| Guano (*)                  | 2382,91                 |
| Madera (*)                 | 2268,09                 |
| Agua (**)                  | 4186,01                 |
| Cobre (**)                 | 390,09                  |

Elaboración propia (\*), (Young, 2009) (\*\*).

La cantidad de masa de cada material que constituye el SAEC, la capacidad calorífica que posee los materiales utilizados y la cantidad de energía que puede acumular el SAEC y los materiales que los constituyen, son representados (tabla 4).

**Tabla 4.** Masa, capacidad calorífica y capacidad de acumulación de energía del SAEC

| Material     | Masa (kg) | Capacidad calorífica (J/K) | Energía acumulada (MJ) |
|--------------|-----------|----------------------------|------------------------|
| Piedra       | 47,5      | 58668,675                  | 4,251                  |
| Guano        | 10,6      | 25614,264                  | 1,856                  |
| Madera       | 8,6       | 19029,822                  | 1,379                  |
| Agua         | 2,7       | 11302,200                  | 0,819                  |
| <b>TOTAL</b> |           |                            | 8,305                  |

Con la test de Tukey, se determinó diferencia significativa entre la temperatura media de HP con las medias de las temperaturas del MAC y HC.

El gráfico comparativo de la evolución de las temperaturas en los ambientes (Figura 4), en donde se observa que las temperaturas para la HP son mayores a las temperaturas registradas para el MAC y la HC, cuyos valores medios son 10,97; 6,5 y 6,69 °C respectivamente.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos (tabla 2), muestran que los materiales y el diseño utilizado permiten lograr que los elementos o partes de una habitación son buenos aislantes térmicos, porque los valores de la resistencia térmica son mayores y los coeficientes de transferencia de calor son menores comparados con los resultados obtenidos por Wu (2015), para ladrillo hueco, cuyos valores medios de coeficiente de transferencia y la resistividad térmica son 0,727 W/m<sup>2</sup>K.

Las paredes de la HP están construidas por adobes de masa agrupada, por su grosor y el tipo de material son identificados, por ello son buenos en retrazar la transferencia de calor a través de la estructura de la construcción durante un periodo de tiempo (Mohammad et al., 2005). Para Ashour et al, (2010), la conductividad térmica de yeso mezclada con cascarillas de trigo, cebada, virutas de madera y yeso puro, son respectivamente 0,19448; 0,154272; 0,23358 y 0,34979 W/mK. Al aumentar el contenido de fibra en aproximadamente 75%, el aislamiento térmico se incrementa a aproximadamente 44,4; 55,9 y 33,2%, la conductividad térmica del adobe elaborado difiere en un 7,3% al del yeso con cascarilla de trigo. Aunque no es conveniente en términos de eficiencia térmica la introducción de materiales vegetales (Catalan, 2016).

La baja conductividad térmica del ladrillo y adobe cuyos valores son de 0,45 y 0,80 W/mK

respectivamente, en un día de verano estos valores pueden variar desde 0,2 hasta 0,16 W/mK, permitiendo variación en la gradiente de la temperatura que contribuye directamente al flujo de calor a través del muro (Borbón et al., 2010). Esto se debe a que el valor de la conductividad térmica de los materiales utilizados es baja en comparación con la de otros materiales metálicos empleados en las estructuras y revestimientos de la construcción tales como el acero y el aluminio cuyo valor de la conductividad térmica son 14 y 235 W/mK respectivamente (Taylor et al., 2008).

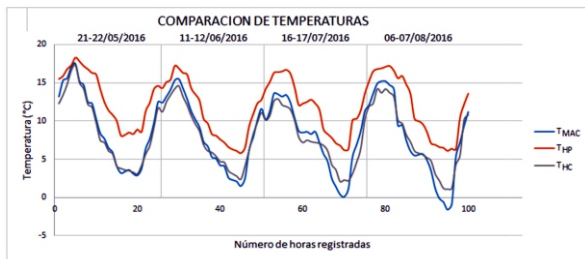
La pared de la HP ha sido elaborado con un tabique de aire el cual es un buen aislante térmico; de acuerdo a las investigaciones realizadas por Kumar et al, (2013), los aislantes térmicos instalados en las paredes de una habitación juegan un rol importante en el ahorro de energía, los techos y paredes convencionales tienen una alta conductividad térmica en comparación a las paredes y techos con aislante térmico. La conductividad térmica de la pared es solo el 34,66% del adobe (tablas 1 y 2), que representa la importancia del tabique de aire adosado a la pared. Siendo el adobe térmicamente estable y reduce la pérdida de calor (Mishra, et al., 2014); la pared de HP es aún más estable térmicamente debido a la reducción del valor de su conductividad térmica.

Los materiales de construcción conocidos como acumuladores de energía, tales como cemento, concreto y ladrillo absorben la energía térmica durante el día y liberan en la noche, logrando reducir el consumo de energía para generar aire acondicionado o calefacción (Libatari et al., 2013). Esta propiedad que permite que los materiales utilizados acumulan una gran cantidad de energía calorífica en comparación con otros materiales más utilizados en el mobiliario y revestimiento de interiores tales como el aluminio, cobre y mármol cuyos valores de su calor específicos son 900, 387 y 860 J/kgK respectivamente (Hassanain et al., 2011). Según Khudhair et al, (2004), los materiales que almacenan energía están hechos de la combinación de los

materiales de cambio de fase mezclados con cemento, obteniéndose materiales de bajo costo con estructuras y propiedades termofísicas apropiadas. Entre los materiales comúnmente utilizados en la construcción rural como ladrillos de arcilla quemada tienen alta energía incorporada de 1,2 – 4,05 MJ / kg seguido de bloques de concreto con 0,17-0,25 MJ / kg y bloques de piedra con 0,007 MJ/kg (Praseeda, *et al.*, 2015). Según Liu *et al.*, (2016), los recientes sistemas que almacenamiento de calor, maximizan la tasa de extracción del calor almacenado reduciendo la resistencia térmica entre el material de cambio de fase a través de la encapsulación utilizando tubos de transferencia de calor. En los sistemas de almacenamiento de energía térmica, es común la utilización de lecho empaquetado compuesto de rocas u otros materiales cerámicos (Yang, *et al.*, 2014).

La mayor intensidad de radiación solar y la alta temperatura ocurren a las 13:00 horas, siendo el flujo de energía de 82,4 W/m<sup>2</sup> a través de un techo estándar (Michels *et al.*, 2008), las curvas comparativas para MAC y HC se superponen y la radiación intensa permite el registro de mayores temperaturas (Figura 4).

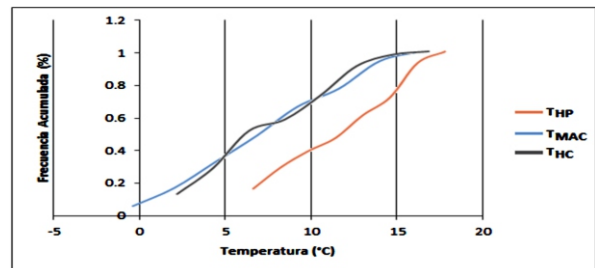
El requerimiento de calor siempre será por la noche, ya que para una familia con cinco integrantes que ocupan una casa, emiten 80 W de calor sensible y 60 W de calor latente durante el día; 75 y 40 W respectivamente, durante la noche (Parra-Saldivar *et al.*, 2006).



**Figura 4.** Evolución de las temperaturas en HP, MAC y HC. Puno, 2016

El aislamiento externo de la pared reduce el calor requerido de 249 MJ en invierno, con la pérdida de calor a través de las paredes externas en un 78 %

(Taylor *et al.*, 2008). El incremento de la sensación térmica medido en una unidad de escala térmica es considerado cuando el incremento es alrededor de 200 W/m<sup>2</sup> de la radiación del cuerpo (Hodder *et al.*, 2007). El esquema de paredes con aislamiento térmico exterior en la construcción de una casa de adobe, mejora el confort térmico elevando la temperatura en 1,46 °C y reduce el consumo de energía ahorrando en un 42,17% (Zhang, *et al.*, 2016).



**Figura 5.** Frecuencias acumuladas de todas las temperaturas. Puno, 2016

Las pendientes correspondiente al análisis estadístico de Frecuencia (AEF) para las temperaturas  $T_{HP}$ ,  $T_{MAC}$  y  $T_{HC}$  (Figura 5) son 0,724; 0,518 y 0,568 respectivamente, donde la pendiente para la temperatura en la HP es mayor que para el MAC y HC, este resultado se contrasta con los resultados obtenidos por Martin *et al.* (2010), afirma que las curvas de AEF de las temperaturas en el interior son casi verticales o de mayor pendiente y eso es típico de la habitación que tiene mayor inercia térmica. Se observa (Figura 5) que las pendientes de las curvas de AEF para las temperaturas de la HP tiene mayor inclinación o pendiente, esto significa que la HP construida tiene mayor inercia térmica en comparación con la HC y el MAC, ya que las pendientes de las curvas de AEF de temperaturas para estas dos medios son menores, la variación de la radiación entre 200 y 400 W/m<sup>2</sup>, no es un incremento significativo en la sensación térmica (Hodder *et al.*, 2007). Según Shukla *et al.*, (2009), por cada 100 m<sup>2</sup> de área urbanizada y la casa de adobe requiere la incorporación de energía de 475 y 59 GJ respectivamente para mantener un ambiente de confort térmico al interior de estos recintos. Según Harman, (2010), CARE Perú ha propuesto el sistema



de confort térmico para una vivienda que tiene un área construida de 54,74 m<sup>2</sup>, constituido por 4 ambientes, ubicado sobre 3500 msnm, donde el invernadero familiar es el elemento importante para la calefacción pasiva diurna.

## CONCLUSIONES

1. Los valores de conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción de la pared, puerta y ventana son de 0,061; 0,030 y 0,027 W/mK respectivamente; que son similares a la conductividad térmica del aire cuyo valor es igual a 0,026W/mK. Por esta razón el flujo de la energía calorífica del interior de la HP hacia el MAC es reducido.
2. Los valores del calor específico de los materiales utilizados en la construcción de SAEC, tales como piedra, guano y madera cuyos valores medias son 1235,13; 2416,44 y 2212,77 J/kgK respectivamente, que son mayores al calor específico de los metales como el cobre que es muy utilizado en la construcción civil y que tiene un valor de 390,09J/kgK. Esta diferencia es la que permite que la construcción de SAEC con materiales como la piedra, guano y madera tenga alta inercia térmica o son buenos acumuladores de calor.
3. Los materiales de construcción utilizados en el SAEC, disponen suficiente capacidad de acumulación de energía, ya que solo el 43,49 % de su capacidad ha sido ocupado cuando se transfirió energía calorífica durante 7 horas de radiación solar directa.
4. La construcción sostenible de una casa se logra utilizando recursos naturales como el barro, madera y yeso, para conservar la energía y lograr el confort térmico al interior de la habitación.
5. Las temperatura medias del interior de la HP es mayor a las temperatura medias de la HC y MAC en un 63,83 y 68,83 % respectivamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto G. A., Karkri M., Lefebvre G., Horn M., Solis J. L., Gómez M.M. (2017). Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.02.001>
- Almujahid, A., Kaneesamkandi, Z. (2013). Construction of a test room for evaluating performance of building wall system under real conditions. *International Journal of Research in Science, Engineering and Tecnology*, 2(6), 8.
- A Kumar, BM Suman. (2013). Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate. *Building and Environment* 59 . 635 - 643 . <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.023>
- Ashour, T., Wieland, H., Georg, H., Bockisch, F. J., & Wu, W. (2010). The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Materials and Design*, 31(10), 4676-4685. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.02>
- Baldille, G., Bianchi, F. (2014). Windows thermal resistance: Infrared thermography aided comparative analysis among finite volumens simulations and experimental methods. *International Journal of Research in Science, Applied Energy*, 136(2014) 250-258.
- Borbón, A.C., Cabanillas, R.E. & Perez. J.R. (2010). Modelacion y Simulacion de la Transferencia de Calor en muro de concreto hueco. *Informacion Tecnologica*, 21(3), 27-38. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000300004>
- Cagnon, H., Aubert, J. E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208-217. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>

- Carli, M. D., Scarpa, M., Tomasi, R., & Zarrella, A. (2012). DIGITHON: A numerical model for the thermal balance of rooms equipped with radiant systems. *Building and Environment*, 57, 126-144. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.016>
- Daudon, D., Sieffert, Y., Albarracín, O., Garino, L., & Navarta, G. (2014). Adobe construction modeling by discrete element method: first methodological 8steps. *Procedia Economics and Finance*, 18, 247-254. doi: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00937-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00937-X).
- E. Quagliarini, MD Orazio, S. Lenci. (2015). The properties and durability of adobe earth-based masonry blocks, in *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks*. F. Pacheco- Torgal, P.B.L.A. Labrincha, and S.K. Chindaprasirt, Editors. Woodhead Publishing: Oxford. p. 361-378.
- G. Catalan (2016). Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks. *Procedia Technology*. 22: p. 259-265.
- Goodhew, S., & Griffiths, R. (2005). Sustainable earth walls to meet the building regulations. 37, 451-459. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.005>.
- Harman, L., (2010), *Confort térmico de Viviendas Altoandinas un enfoque integral*. Lima, Perú: Talleres gráficos de Balcari Editores SAC, Jr. Yungay 1695, Chacra Ríos Norte.
- Hassanain, A. A., Hokam, E. M., & Mallick, T. K. (2011). Effect of solar storage wall on the passive solar heating constructions. 43, 737-747. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.020>
- Hodder, S. G., Parsons, K. (2007). The effects of solar radiation on thermal comfort. *Int J Biometeorol* (2007) 51: 233-250.
- Johansson, E., Rohinton, E. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 119-133.
- Litibari, S.T., Mehrali, M., Mahlia, T.M.I., Metselaar, H.S.C. (2013). Synthesis characterization and thermal properties of nanoencapsulated phase change material via sol-gel method. *Energy*; 61, 664-672. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.012>
- Liu M, Steven N H, Bell S, Belusko M, Jacob R, Will G, Saman W, Bruno F. (2016). Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1411-1432. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026>
- Martín, S., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2010). Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos ( Spain ): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia. *Construction and Building Materials*, 24(5), 666-676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.002>
- Michels, C., Lamberts, R., Güths, S. (2008). Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs. *Energy and building*, 40(4) 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.013>
- Mishra, JA Usmani. (2014). Energy conservation in mud house as compared to brick wall building in India. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies E-ISSN* 2249-8974.
- Minke, G. (2006). *Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhauser-Publishers for Architecture, Berlin. 198p.
- Mohammad, Dr. S., Al-Homoud. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353-366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>
- Morony, J. J. (2004). Adobe and latent heat, a cristal connection. *Biology Department Southwest Texas Junior College*, 12-34.
- Neves, C., Borges, O.F. (2011). *Técnicas de Construcción con Tierra*. Bauru, Brasil.: Red Iberoamericana Proterra.

- Pacheco - Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Praseeda, K. I., Reddy, B. V. V., & Mani, M. (2015). Embodied energy assessment of building materials in India using process and input–output analysis. *Energy and Buildings*, 86, 677–686. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.042>
- Parra-Saldivar, M., Batty, W. (2006). Thermal behaviour of adobe construction. *Building and environment*, 41(12), 1892-1904. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.021>
- Shukla, A., Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2009). Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*, 34(3), 755–761. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>
- Khudhair, A. M., Farid, M. M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 263-275. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6)
- Taylor, P., Fuller, R. J., Luther, M. B. (2008). Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and Building*, 40(5), 793-800. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.013>
- Wu, J., Bai, G.-l., Zhao, H.-y., & Li, X. (2015). Mechanical and thermal tests of an innovative environment-friendly hollow block as self-insulation wall materials. *Construction & Building Materials*, 93, 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.003>
- V. Sharma, H.K. Vinayak, and B.M. Marwaha. (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2015.07.002>
- Yang X, Qin FGF, Jiang R. (2014). Experimental investigation of a molten salt thermocline storage tank. *Int J Sustain Energy*, 35(6), 1–9. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.930465>
- Young, H. D., Freedman, R.A. (2009). Física Universitaria (Vol. I). México Pearson Educación.
- Zhang, J., Xu, W., Li, A., Zheng, K., & Zhang, J. (2016). Study on improving thermal environment and energy conservation of quadrangle adobe dwelling. *Energy and Buildings*, 129, 92–101. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.048>

