

TECHNOLOGY FOR THE OPTIMIZATION OF THE HEATING PROCESS AND OTHER BENEFITS OF LIVING COMFORT OF AN EXPERIMENTAL DOME PROTOTYPE USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) INSTALLED IN THE CITY OF URUBAMBA - CUSCO

Salinas Mena, Mateo Alejandro, Ramos Cutipa, José Manuel², Vilca Choque, Mary Cymbel³, Vilca Callata, Leonidas⁴ Paredes Pareja, Walter Oswaldo⁵, Shuta Lloclla, Henry⁶ y Beltran Castañon, Norman Jesus⁷

¹Universidad Nacional del Altiplano, Perú, msalinas@unap.edu.pe

²Universidad Nacional del Altiplano, Perú, jramos@unap.edu.pe

³Universidad Nacional del Juliaca, Perú, cymbelmar@unaj.edu.pe

⁴Universidad Nacional del Altiplano, Perú, lvilca@unap.edu.pe

⁵Universidad Nacional del Altiplano, Perú, walterparedes@unap.edu.pe

⁶Universidad Nacional del Altiplano, Perú, henryshuta@unap.edu.pe

⁷Universidad Nacional del Juliaca, Perú, nbeltran@unaj.edu.pe

Abstract– The research paper has been carried out the air conditioning of a prototype "experimental dome", in cold and freezing zones for high altitude in order to house tourists with thermal comfort and / or care of victims of natural disasters. It is based on solar energy by thermal accumulation (TES) with phase change materials (PCM), using air as transport vehicle. The experimental dome of base 50 m² was installed in the city of Urubamba-Cusco, in which all the components of the heating system were designed, which allowed to analyze the thermal insulation behavior and the materials and equipment used. The results of the piloting were obtained during three months of friaje: May, June and July 2015, whose research is applied semi-empirical and explanatory correlational type, for which the balance of thermal loads was performed, determining mathematical models, using multiple linear regression, and rotational factorial design 2³, which allowed determining the optimal values of temperature (Ti) and relative humidity (HRi) inside the dome, as a function of the dynamic variation over time of the environmental and design parameters. For this project, its economic technical viability was evaluated, which allowed to determine its profitability by applying the Payback method, whose capital recovery was three and a half years, as well as evaluating the energy saving and the reduction of the environmental impact.

Keywords--: Air conditioning, heating system design, modeling optimization and phase change materials.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.463>

ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Tecnología para la Optimización del Proceso de Calefacción y otros Beneficios de Confort de Habitabilidad de un Prototipo Domo Experimental Utilizando Materiales de Cambio de Fase (PCM) Instalado en la Ciudad de Urubamba - Cusco

Salinas Mena, Mateo Alejandro, Ramos Cutipa, José Manuel², Vilca Choque, Mary Cymbel³, Vilca Callata, Leonidas⁴ Paredes Pareja, Walter Oswaldo⁵, Shuta Lloclla, Henry ⁶ y Beltran Castañon, Norman Jesus⁷

¹Universidad Nacional del Altiplano, Perú, msalinas@unap.edu.pe

²Universidad Nacional del Altiplano, Perú, jramos@unap.edu.pe

³Universidad Nacional del Juliaca, Perú, cymbelmar@unaj.edu.pe

⁴Universidad Nacional del Altiplano, Perú, lvilca@unap.edu.pe

⁵Universidad Nacional del Altiplano, Perú, walterparedes@unap.edu.pe

⁶Universidad Nacional del Altiplano, Perú, henryshuta@unap.edu.pe

⁷Universidad Nacional del Juliaca, Perú, nbeltran@unaj.edu.pe

Resumen– En el artículo de investigación se ha realizado la climatización de un prototipo “domo experimental”, en zonas de friaje y heladas para gran altitud con el fin de albergar turistas con confort térmico y/o atención de damnificados por desastres naturales. Se basa en captar la energía solar mediante acumuladores térmicos (TES) con materiales de cambio de fase (PCM), usando como vehículo transportador el aire. El domo experimental de 50 m² de base se instaló en la ciudad Urubamba- Cusco, en el cual se ha diseñado todas las componentes del sistema de calefacción, que permitió analizar el comportamiento del aislamiento térmico y los materiales y equipos utilizados. Los resultados del pilotaje se obtuvieron durante tres meses de friaje: mayo, junio y julio del año 2015, cuya investigación realizada es aplicada semi empírico y explicativo de tipo correlacional, para lo cual se realizó el balance de cargas térmicas, determinándose los modelos matemáticos, mediante regresión lineal múltiple, y diseño factorial rotacional 23, lo que permitió determinar los valores óptimos de temperatura (Ti) y humedad relativa (HRi) en el interior del domo, en función de la variación dinámica en el tiempo de los parámetros ambientales y de diseño. Para el presente proyecto se evaluó su viabilidad técnica económica que permitió determinar su rentabilidad aplicando el método Payback, cuya recuperación de capital del PCM fue de tres años y medio; se evaluó también el ahorro energético y la reducción del impacto ambiental

Palabras clave: Climatización, diseño del Sistema de calefacción, modelamiento matemático and materiales de cambio de fase.

Abstract– The research paper has been carried out the air conditioning of a prototype “experimental dome”, in cold and freezing zones for high altitude in order to house tourists with thermal comfort and / or care of victims of natural disasters. It is based on solar energy by thermal accumulation (TES) with phase change materials (PCM), using air as transport vehicle. The experimental dome of base 50 m² was installed in the city of Urubamba-Cusco, in which all the components of the heating system were designed, which allowed to analyze the thermal

insulation behavior and the materials and equipment used. The results of the piloting were obtained during three months of friaje: May, June and July 2015, whose research is applied semi-empirical and explanatory correlational type, for which the balance of thermal loads was performed, determining mathematical models, using multiple linear regression, and rotational factorial design 23, which allowed determining the optimal values of temperature (Ti) and relative humidity (HRi) inside the dome, as a function of the dynamic variation over time of the environmental and design parameters. For this project, its economic technical viability was evaluated, which allowed to determine its profitability by applying the Payback method, whose capital recovery was three and a half years, as well as evaluating the energy saving and the reduction of the environmental impact.

Keywords–: Air conditioning, heating system design, modeling optimization and phase change materials.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la estación climática fue diferente con respecto a los años anteriores en la ciudad de Urubamba-Cusco, durante la estación de invierno, en las zonas altas de la región de Cusco se han presentado cambios climatológicos muy bruscos, el cual está relacionado con el descenso de las temperaturas hasta condiciones extremas, llegando incluso a registrarse temperaturas por debajo de los 0°C.

Para hacer frente a esta amenaza que se repite todos los años, se propuso una alternativa de solución de larga duración y técnicamente viable para la zona como es el almacenamiento de energía solar térmica (TES) con material de cambio de fase (PCM), que poseen la capacidad de almacenar calor latente proveniente del sol y/o ceder durante las horas de la noche o en las horas que no hay sol.

Se describen diversas instalaciones de climatización en donde se han incorporado de forma satisfactoria los materiales de cambio de fase (PCM) [1], se estudian diversos tipos de instalaciones tanto con sistemas de producción de energía térmica, como las que aprovechan el frío gratis del aire de forma directa (free cooling) o indirecta mediante sistemas evaporativos, o los que aprovechan calores residuales o cogeneración. Considerando las múltiples posibilidades que presentan los PCM.

La calefacción se define como la forma de calentar espacios helados habitados por personas [2]. Siendo su objetivo central regular la pérdida de calor del cuerpo humano durante las épocas de frío.

Los materiales de cambio de fase son almacenadores o retenedores de calor latente [3], también se ha demostrado que sistemas con estructura orgánica soportan muchos ciclos de fusión y solidificación no se sub enfrían.

Los átomos en la fase líquida presentan mayor energía que en la fase sólida, por ende, cuando un sólido se funde, adquiere una gran cantidad de energía, para superar fuerzas de atracción, que son las que mantienen estable la fase sólida. Esta energía, es calor latente de cambio de fase y representa una diferencia térmica, lo que se llama entalpia de fase, liquido-solido, ya para solidificar, se tendrá que hacer cadencia de toda esta energía, para que los átomos recuperen su estabilidad [4].

La dificultad que ofrecen los cuerpos para cambiar de estado, se denomina inercia térmica [5], en este proceso un cuerpo cambia su temperatura y se obtiene cuantificado su masa térmica.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Lugar de estudio

El lugar de estudio está ubicado en la región de Cusco, provincia de Urubamba a una altitud de 2869 msnm en la Cuenca del valle sagrado a 57km al noreste de la ciudad del Cusco. Esta entre las coordenadas 13° 18'37", longitud sur y 72° 07'12" Longitud Oeste

B. Datos climatológicos

Tabla I. Se presentan los valores medios diarios mensuales de radiación solar en la región del Cusco, estableciéndose 4 zonas donde están ubicadas las estaciones meteorológicas correspondiendo la zona 2, el área de estudio donde está ubicado el prototipo experimental para una latitud de -13°17'5", Longitud -72°07'0" y una altitud promedio de 2900 m.s.n.m. La radiación promedio diario mensuales de 19.167 MJ/m²-día, que corresponde al valor de: 5.32 kWh/m²-día

TABLE I
VALORES MEDIOS DIARIOS MENSUALES DE RADIACIÓN SOLAR EN CUSCO

Mes	Zona 1 (MJ/m ²)		Zona 2 (MJ/m ²)		Zona 3 (MJ/m ²)		Zona 4 (MJ/m ²)	
	Hd	Hd*	Hd	Hd*	Hd	Hd*	Hd	Hd*
Enero	18.3	17.7	18.4	18.7	21.9	21.8	15.8	15.8
Febrero	17.9	18.7	18.2	20.2	21.5	22.2	13.3	15.6
Marzo	19.1	18.6	19.3	19.2	20.5	21.3	14.4	16.7
Abril	17.5	18.8	17.8	17.6	20.8	21.6	15.1	17.1
Mayo	18.6	17.9	18.9	17.8	19.8	20.5	15.9	17.4
Junio	15.5	16.3	15.8	16	18.7	18.6	15.4	15.9
Julio	17.1	17.4	17.5	17.2	18.9	18.8	17.3	16.7
Agosto	20.8	18.3	21.3	18.1	20.8	20.4	17.7	16.3
Septiembre	19	19.3	19.6	17.5	22.8	23	19.4	16.9
Octubre	19.4	20.7	19.9	22	23.7	23.6	20.5	18
Noviembre	20.8	21.4	21.2	21.2	24.7	23.8	18.4	17.5
Diciembre	21.8	20.5	22.1	20.5	23	22.4	16.6	15.7
Promedio	18.817	18.8	19.167	18.833	21.425	21.5	16.65	16.633

Fuente: CECADE 2012. Hd: valor medido, Hd*: valor calculado por correlación.

Los parámetros del ambiente exterior, depende de la localización geográfica del domo objeto de estudio en la ciudad de Urubamba, cuyos datos necesarios para definir el ambiente extremo del domo, pertenecen a los meses más fríos del año: mayo, junio y julio. Los parámetros del ambiente exterior donde está instalado el domo, varían a lo largo del año, no siendo iguales para el invierno y el verano, así como para el día y la noche.

Temperatura Ambiental exterior (Tex): Según datos obtenidos de Nasa – EE.UU., para una latitud de -13.305° y longitud de -72.116° de la ciudad de Urubamba, se tiene una temperatura exterior promedio anual registrados de 22 años de: Tex, anual = 9.57 °C, como se muestra en la Tabla II.

TABLE II
MONTHLY AVERAGE AIR TEMPERATURE AT 10M ABOVE THE SURFACE OF THE EARTH (°C)

Lat-13.305 Lon -72.116	Temperature		
	22-year Average	Minimum	Maximum
Jan	10.9	8.69	13.4
Feb	10.7	8.47	13.3
Mar	10.7	8.47	13.4
Apr	9.97	7.52	12.9
May	8.5	5.11	12.4
Jun	7.32	3.12	12.1
Jul	6.9	2.08	12.4
Aug	8.13	3.3	13.6
Sep	9.3	5.17	13.9
Oct	10.4	6.94	14.5
Nov	10.8	8.02	14.2
Dec	11	8.69	13.6
Annual Average	9.57	6.28	13.3

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

Descripción de la Vivienda Prototipo Domo experimental: El domo experimental está conformado por una envoltura que esta sobre el soporte de una estructura metálica semiesférica uniformemente distribuido que representa las paredes y el techo. La envoltura o cerramiento consta de una película externa de aire (ambiente exterior), una cobertura externa de PVC, un material aislante de polietileno reticulado (PER), un cámara de aire por donde circula el aire caliente y una cobertura interior de PVC. El piso tiene un pequeño sobre cimiento de 25 cm, cuyo acabado es de parket, dispone de un área traslúcida que representa a una ventana a 2/3 de altura del domo, en la cual están colocados los acumulares solares PCM23 en todo el contorno que permite absorber la radiación solar durante el día (cargándose el acumulador) y durante la noche se descarga calentando el aire que circula por diferencia de densidades, al interior del domo.

Este proceso de calefacción permite en el día (6 am a 6 pm) cargarse el acumulador solar PCM23 (material de cambio de fase a 23 °C como calor latente) en el cual el material acumulador cambia de fase de estado sólido a líquido (licuación) y en la noche se descarga (cuando no hay sol) en el cual el material acumulador invierte la fase en sentido inverso de líquido a sólido (solidificación), repitiéndose el ciclo diariamente debido a las pérdidas de calor. Se dispone de dos puertas (interna y externa) y en la noche se cierra el área traslúcida.

La vivienda consta de 50 m² distribuidos en una única planta en la que se sitúan una sala, comedor, un dormitorio con dos camas, una cocina un baño y un depósito.

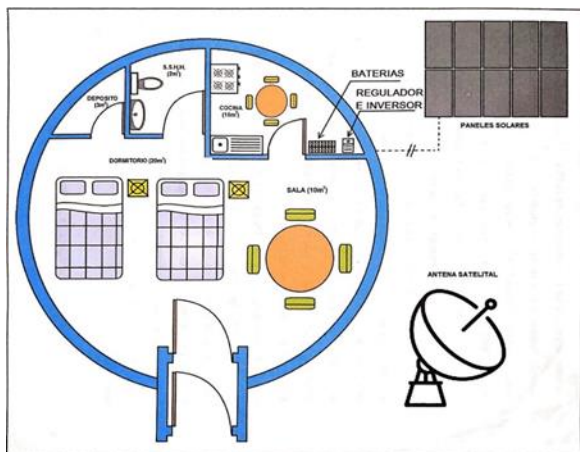


Fig.1. Distribución de planta del domo experimental. Elaboración propia.

C. Método de investigación

Es la misma población representativa fijada para los dos sectores que van a hacer uso del domo comercial según los beneficios, usos y costos que estas representan, correspondientes a un diseño propiamente cuasiexperimental, para un prototipo "Domo Experimental", previamente

diseñado e implementado, como una unidad experimental (UE).

Según la estructura lógica del experimento se planteó primero la manera en la cual los tratamientos son asignados a la unidad experimental, que es el prototipo domo experimental. Se realizó tres tratamientos a la UE (cuyos factores son la cantidad de placas del acumulador PCM23 (N), el espesor del polietileno PER (E) y el ancho de la cámara de aire (C) que prácticamente este último fue constante por las condiciones del diseño), cuyo efecto sobre el estado de confort (variable respuesta) se determinó.

Se determinó como variables respuestas primero el comportamiento de los parámetros de temperatura (T) y humedad relativa (HR) dentro y fuera del domo durante las 24 horas del día medidos con los ocho sensores; luego se determinó el comportamiento de la temperatura (Ti) y humedad relativa (HRi) en el interior del domo (como parámetros de confort), para ver el efecto de los parámetros ambientales (temperatura, humedad y presión atmosférica) y el efecto del acumulador (TPCM) durante las 24 horas del día, utilizando el diseño de regresión lineal múltiple, finalmente se determinó el estado de confort en el interior del domo (Ti, HRi), según la variación de los parámetros de diseño de los materiales sostenibles (NPCM, EPER, CCA) utilizando el diseño factorial compuesto 2³.

Con los resultados obtenidos fue posible determinar el ahorro energético y la reducción del impacto ambiental, así como el periodo de la recuperación de la inversión, que es aproximadamente de tres años y medio determinado por el método del indicador econométrico Payback.

Es necesario indicar que para la estimación del modelo del diseño de experimentos se consideró cuatro fases típicas:

1. Identificación, que permitió determinar la ecuación del modelo, variables dependientes e independientes y el tipo de diseño adecuado.
2. Estimación, del modelo matemático y estadístico más adecuado y el uso de herramientas informáticas utilizadas: Matlab, Minitab y Diseño Experto.
3. Diagnóstico, se realizó los contrastes para la prueba de hipótesis y diagnosticar la significancia grupal (F – Fisher) e individual (t-Student) de sus parámetros del modelo, sus parámetros estadísticos y los supuestos del residuo (normalidad, varianza constante y aleatoriedad).
4. Predicción, con el modelo del diseño adecuado obtenido del proceso de calefacción, se predijo sus valores óptimos para la temperatura y humedad relativa en el interior del domo como parámetros de confort.

El conjunto de datos de las observaciones de los parámetros ambientales (Tamb, HRamb, PAtmf, Temperatura del acumulador PCM 23 (Tpcm), Registrados (cada minuto) por 8 sensores marca Oregon (Ubicados en los ambientes exterior e interior del domo), durante los 3 meses de friaje (mayo, junio y julio).

El segundo registro de datos para el diseño de regresión lineal múltiple, se realizó para el promedio trimestral de las 7

variables (T_{ex} , HR_{ex} , t , $TPCM$, PA_{mf} , T_i , HR_i) durante las 24 horas.

Con estos datos se obtuvo el modelo matemático y su comportamiento dinámico en el tiempo de la temperatura interior (T_i) y humedad Relativa (HR_i) en el interior del domo durante las 24 horas (promedio trimestral).

El tercer registro de la muestra de datos para el diseño factorial compuesta 23, donde se tiene 3 variable independientes (N° de PCM: N , Espesor del PER: E y ancho de la cámara de aire: C) y 2 variable dependientes (Temperatura: T_i y humedad Relativo: HR_i , en el interior del domo).

A este domo se le incorporó las placas acumuladoras de energía PCM23, ubicándolos en el área traslúcida, cargándose térmicamente durante el día mediante la radiación solar y descargándose durante la noche de los PCMs al aire que circula por la cámara y el interior del domo en forma natural por diferencia de densidad

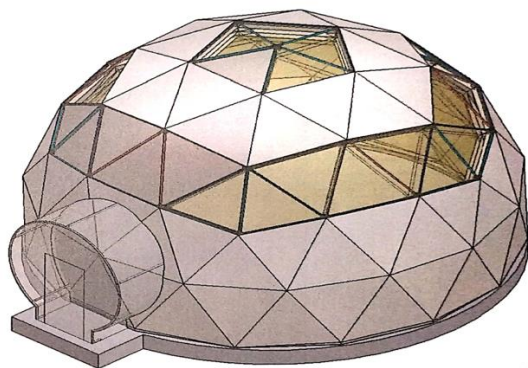


Fig.2. Diseño del domo

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis del balance energético del domo experimental

El balance energético del domo experimental está determinado por las pérdidas y aportes de calor, considerándose 2 estados comparativos inicial para espesor del PER de 5 cm y final para espesor del PER de 10 cm, cuyos coeficientes globales de transferencia de calor son respectivamente $0.5934 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ y $0.3212 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$. Según las mejoras realizadas se redujo las pérdidas de calor principalmente en la transmisión, considerando 17 Hrs (durante el día en que no hay el sol) y 12 hrs durante la noche (de 6 pm a 6 am); cuyos resultados se indican en las siguientes tablas de pérdidas de calor.

Conocido los aportes y demanda energética podemos hallar el Balance Energético mensual y trimestral para los meses de friaje y su autonomía correspondiente. El Balance Energético nos permite determinar que los aportes generales cubren (o es igual) a la demanda de calefacción requerida y la autonomía (A) nos permite determinar la cantidad de horas o días adicionales que se tenga como reserva para los días que no hay sol, los mismos que se indican en el cuadro del

Balance energético de la Tabla III, donde se muestra el aporte y demanda térmica de calor y autonomía para 60 placas de acumulador PCM23 y además el cuadro se muestra que la autonomía promedio trimestral fue de medio día (0.5 días) para porcentaje de licuación del 100% y 0.21 para porcentaje de licuación de 74.4%.

Respecto a los meses de Friaje el balance térmico va disminuyendo de mayo a julio siendo menor en el mes de julio, lo que significa que en este mes hay mayor demanda térmica (10.2871 Kwh) debido a que hay mayor friaje por lo que se tiene una acumulación mínima de solo 0.893 Kwh para porcentaje de Licuación del 74.44% y 3.193 KWH para porcentaje de licuación del 100%, teniendo un promedio diario trimestral de 1.92 KWH (para %L = 74.44) y 4.22 Kwh (para %L = 100%), logrando tener una autonomía de 0.21 y 0.50 para %L de 74.44% y 100% respectivamente.

Fue importante también determinar la cantidad de placas requerido por el acumulador PCM23, que nos permita tener una autonomía de 1 día y 2 días que fueron obtenidos para un porcentaje de licuación (%L) de 100% (cargado completamente) y 74.44% (calculado parcialmente como promedio).

TABLE III
BALANCE ENERGÉTICO

Balance	Meses de Friaje						Promedio Trimestral	
	Mayo		Junio		Julio		%L =10	%L= 74.4
	%L= 10	%L =74	%L= 100	%L= 74.4	%L= 100	%L= 74.4		
Total de aporte de calor M y T (KWH)	13.48	11.18	13.48	11.18	13.48	11.18	13.48	11.18
Demanda térmica de calor promedio M y T (KWH)	8.43	8.43	9.06	9.06	10.29	10.29	9.26	9.26
Acumulación térmica de calor promedio M y T (KWH)	5.05	2.75	4.42	2.12	3.19	0.89	4.22	1.92
Autonomía de calor promedio diario M y T (Hrs o día)	0.6	0.33	0.5	0.23	0.31	0.1	0.5	0.21

Fuente: Elaboración propia..

B. Análisis de la regresión lineal múltiple de la temperatura (t_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo:

El análisis de varianza obtenido con el programa MINITAB. En base al modelo de la regresión lineal múltiple se muestran los resultados en la Tabla IV, para el diseño de regresión múltiple. Los términos más significativos de variabilidad, con base a un nivel de significancia de 5%, para cada una de las variables respuestas están relacionados. Las variables independientes en la forma codificada componen cada uno de los términos que son factores lineales principales.

Cada término revela su contribución porcentual en la variabilidad total de la variable respuesta. En base a estos valores fue establecido el orden decreciente de izquierda a derecha con que los términos fueron posicionados según su influencia en la variable respuesta. Para la temperatura interior (Ti) influye más X1 que corresponde a la temperatura exterior (Tex) luego X4 que corresponde a la temperatura del acumulador PCM23 y finalmente con menor porcentaje X2 que corresponde a la humedad relativa exterior (HRe). Para la humedad relativa interior (HRI) influye más X2 que corresponde a la humedad relativa exterior (HRe), luego X5 con casi igual porcentaje que corresponde a la presión atmosférica (Patm) y finalmente X1 que corresponde a la temperatura exterior (Tex). Concluyéndose que estos tres términos lineales X1, X4 y X2 influyen en la temperatura interior (Ti), con el 92.6% mientras que los tres términos lineales X2, X5 y X1 influyen con el 72.49% en la humedad relativa del Domo (HRI)

TABLE IV
TÉRMINOS MÁS SIGNIFICATIVOS DE VARIABILIDAD DE CADA VARIABLE RESPUESTA OBTENIDA DEL DISEÑO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Variable Respuesta	Términos más significativos (significancia < 5%)		
Temperatura Interior del Domo (Ti)	X1 (L) (56.2%)	X4 (L) (23.53%)	X2 (L) (12.87%)
Humedad Relativa Interior del Domo (HRI)	X2 (L) (28.22%)	X5 (L) (26.9%)	X1 (L) (17.37%)

Fuente: Elaboración propia

C. Resultados obtenidos del diseño factorial compuesto 2^3

Como resultado obtenemos que la temperatura interior del domo, depende principalmente de la cantidad de PCM23 (N) y del espesor del aislamiento térmico del PER (E), influyendo entre estos 3 términos con 99.57%. Para la Humedad Relativa interior del domo (HRI), influye más X1 que corresponde a la temperatura exterior (Tex), seguido por X3, que corresponde al espesor del aislamiento térmico del PER (E), luego por la interacción X1X3, que corresponde al producto de la cantidad de placas de PCM23 por el espesor del aislamiento térmico del PER (N*E), finalmente en menor porcentaje los términos cuadráticos X1(Q) y X3(Q) que corresponde a los términos cuadráticos de la temperatura exterior () y espesor del PER () con solo 0.28% y 0.26% respectivamente.

Concluyéndose que la Humedad Relativa interior (HRI) depende principalmente de los términos lineales de la cantidad del acumulador PCM23 (N) y el espesor del aislamiento térmico del PER (E), influyendo entre estos dos con un 98.47%.

D. Resultados y discusión del estudio económico, ahorro energético y reducción del impacto ambiental

En el proceso de calefacción los 2 elementos más importantes son el cerramiento o envoltura y el acumulador Solar Término.

En el primer caso juega un papel importante el aislante. Polietileno Reticulado (PER) que evita las pérdidas de calor al exterior y en el segundo caso el material de cambio de fase (PCM23) que entrega el calor latente mediante calefacción por aire al interior del domo. Si bien los resultados de utilizar estos materiales sostenibles son viables técnicamente, ya que al aumentar el espesor del PER(E) disminuye las pérdidas de calor al exterior, al aumentar la cantidad de acumuladores solares PCM23 aumenta la transferencia de calor al interior del domo.

La viabilidad técnica económica de dichas soluciones nos permite ser competitivos con otras alternativas de soluciones impuestas.

Se calculó la tasa de rentabilidad económica del acumulador solar PCM 23 aplicando el método de PAYBACK. Resultando su periodo de recuperación de la inversión de 3 años y medio.

Para un mix eléctrico referencial de anhídrido carbónico (CO2 de 0.215 Kg de CO2 / KWH se tiene un ahorro de emisión trimestral de 174. 29 Kg de CO2 para %L = 100% y de 132.52 Kg de CO2 para %L = 74.44%.

Así mismo el ahorro de emisiones de anhídrido carbónico (CO2) utilizando el material de cambio de fase (PCM23) respecto al uso del gas natural para calefacción es de 166.4 Kg de CO2/ trimestre.



Fig.3. Domo experimental instalado en la ciudad de Urubamba - Cusco

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos fueron realizados para los meses más críticos de friaje (mayo, junio y julio) y durante la noche (6 pm a 6 am). Se hizo el desarrollo de los modelos matemáticos completos para analizar el efecto de la cantidad del acumulador PCM23 (N), espesor del aislamiento térmico del PER (E) y el ancho de la cámara de aire (C) en el estado de confort, determinado por la temperatura interior (T_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo, se halló los valores óptimos por el método de programación lineal sujeto a restricciones de sus parámetros de diseño, obteniéndose: N = 60 placas del Acumulador PCM23, E = 10 cm de espesor del aislamiento del PER y C = 10 cm de espesor de la cámara de aire, con las cuales se obtuvo aproximadamente una temperatura interior máxima de $T_{i,máx} = 18^{\circ}\text{C}$ y Humedad Relativa interior mínima de $\text{HR}_{i,mín} = 36\%$, para una temperatura exterior $T_{e,x} = 7.71^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa exterior $\text{HR}_{e} = 67.6\%$ (obtenido con la herramienta calculadora de humedad), lográndose tener un alto térmico de 10°C y una reducción de la humedad de 31.6% respecto al exterior.

Se consideró utilizar como reserva un generador a gas para calefacción en el supuesto que no haya sol uno o más. Comparativamente para el caso de tener una autonomía A = 1 día, con la alternativa propuesta se requeriría de N = 94 placas del acumulador solar PCM23 para %L = 100% y N = 126 placas para %L = 74.44%, mientras que para una autonomía A = 2 días sin sol, se requeriría 155 placas de PCM23 para %L = 100% y 209 placas para %L = 74.44%.

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento especial al Dr. Manuel Dominguez Alonso, de la Universidad Complutense de Madrid e Instituto del Frio-España, a la Universidad Nacional de Chile por sus asesoramientos en el desarrollo del presente proyecto. Así mismo al FENCYT por haber financiado este proyecto en la Ciudad de Urubamba (Cusco) y Mazocruz (Puno) mediante la Empresa Domos Perú.

REFERENCES

- [1] Domínguez, M., & Garcia, C. (2009). Aprovechamiento de los materiales de cambio de fase (PCM) en la climatización. *Información Tecnológica*, 20(4), 107-115. <https://doi.org/10.1612/inf.tecol.4076it.08>
- [2] Ampuero V., L. (2010). Sistema de calefacción a leña. In *Hitoria* (Issue 1931).
- [3] Ochoa H., A. (2016). Evaluación de parafina comercial como materia de cambio de fase para almacenamiento de energía. <https://core.ac.uk/download/pdf/198447145.pdf>
- [4] Alexiades, V., & Solomon, A. D. (1993). Mathematical modeling of melting and freezing processes. In *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*. <http://www.math.utk.edu/~vasili/475/Handouts/3.PhChgbk.1+title.pdf>
- [5] Bannier, E., Cantavella, V., Bou, E., & Castellano, J. (2003). Inercia térmica de la envolvente de edificios y su influencia en la demanda energética.