

Optimización de transferencia de calor en sistemas de suelo radiante en viviendas del Altiplano de Puno

Optimization of heat transfer in underfloor heating systems in homes in the Puno Highlands

Dany Alexander Aguilar Mamani^{1,*} , Omar Luis Neira Cutipa² , Elard Cesar Estofanero Jara³ , Juan Reynaldo Yujra Segales⁴ , y Gloria Arazola Mamani⁵ 

¹Universidad Nacional del Altiplano(UNAP), Perú, Doctor en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, Correo: aquiladan82@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7519-5453>

²Universidad Nacional del Altiplano(UNAP), Perú, Magíster Scientiae en Ciencias de la Ingeniería Mecánica Eléctrica, Correo: oneira@unap.edu.pe, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3837-8266>

³Universidad Nacional del Altiplano(UNAP), Perú, Ingeniero Mecánico Electricista, Correo: estofanerojara@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5543-651X>

⁴Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Bolivia, Magíster Scientiae en Programa de Maestrías para el Desarrollo, Correo: jryujra@umsa.bo, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2734-7011>

⁵Universidad Nacional del Altiplano(UNAP), Perú, Bachiller en Ciencias de la Educación, Correo: arazolagloria@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5982-5029>

Resumen

El altiplano de Puno sufre de bajas temperaturas durante todo el año, más en estación de invierno causando muertes a niños, adultos mayores y animales de la zona, nuestra investigación se propuso como objetivo principal optimizar la eficiencia térmica del sistema de suelo radiante mediante la incorporación de aditivos conductivos en las mezclas de concreto, adaptadas a las condiciones climáticas extremas de la región altoandina. La metodología empleada fue de tipo experimental, basada en la elaboración de distintas placas de concreto con materiales de alta conductividad térmica, tales como: Sika, virutas de aluminio, cemento conductivo, alambres de cobre y yeso. Se caracterizaron las propiedades térmicas, mecánicas y de durabilidad de cada mezcla en un entorno controlado con las condiciones ambientales del altiplano. Los resultados experimentales demostraron que el concreto modificado con cemento conductivo presentó el mejor desempeño térmico, alcanzando una temperatura superficial de 53 °C en un tiempo de 40 minutos de circulación de agua a 87 °C. En segundo lugar, la mezcla con adición de yeso logró una temperatura de 45 °C bajo las mismas condiciones. Estas variantes mostraron una distribución térmica más homogénea y una mayor eficiencia en la transferencia de calor, lo cual incide positivamente en el confort térmico interior. Se concluyeron que la incorporación de materiales conductivos como el cemento conductivo y el yeso en sistemas de calefacción por suelo radiante representa una alternativa tecnológica viable y eficaz para mejorar la eficiencia energética y las condiciones de habitabilidad en zonas de baja temperatura como el altiplano puneño.

Palabras clave: Cemento conductivo, concreto, propiedades térmicas, suelo radiante, temperatura, transferencia de calor.

Abstract

The Puno plateau suffers from year-round low temperatures, especially in winter, causing fatalities among children, the elderly, and animals in the area. Our research aimed to optimize the thermal efficiency of underfloor heating systems by incorporating conductive additives into concrete mixes adapted to the extreme climatic conditions of the high Andean region. The methodology employed was experimental, based on the preparation of different concrete slabs with highly thermally conductive materials, such as Sika, aluminum shavings, conductive cement, copper wires, and gypsum. The thermal, mechanical, and durability properties of each mix were characterized in a controlled environment with the environmental conditions of the high plateau. The experimental results demonstrated that the concrete modified with conductive cement exhibited the best thermal performance, reaching a surface temperature of 53 °C after 40 minutes of circulating water at 87 °C. Secondly, the mix with the addition of gypsum reached a temperature of 45 °C under the same conditions. These variants demonstrated more homogeneous thermal distribution and greater heat transfer efficiency, which positively impacts indoor thermal comfort. They concluded that the incorporation of conductive materials such as conductive cement and gypsum in underfloor heating systems represents a viable and effective technological alternative for improving energy efficiency and living conditions in low-temperature areas such as the Puno plateau.

Keywords: Concrete, conductive cement, heat transfer, thermal properties, temperature, underfloor heating.

Recibido: 05/07/2025

Aceptado: 30/07/2025

Publicado: 30/09/2025

***Autor para correspondencia:** aquiladan82@gmail.com

Cómo citar: Aguilar Mamani, D. A., Neira Cutipa, O. L., Yujra Segales, J. R., Estofanero Jara, E. C., & Arazola Mamani, G. . (2025). Optimización de transferencia de calor en sistemas de suelo radiante en viviendas del Altiplano de Puno. *Revista De Investigaciones*, 14(3) 130-143. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i3.6980>

Introducción

En las sociedades actuales, el uso de energía común y sus efectos adversos sobre el calentamiento global y la contaminación atmosférica son cuestiones que suscitan considerable preocupación mundial (Mahmoudi et al., 2017); (Ignacio Álava Gregores, 2015). Las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, derivadas de la combustión de combustibles fósiles a base de carbón, petróleo y otros, han provocado el calentamiento global y en otras áreas del planeta el enfriamiento extremo (Xue et al., 2017). El cambio climático está impulsando la demanda de aire acondicionado (en zonas calientes) y aire temperado (en zonas frías) el uso de refrigerantes convencionales y calentadores de ambiente utilizando energía convencional calientan aún más el planeta (Davis & Gertler, 2015); (Santamouris, 2016); (McLinden et al., 2020).

Evaluar y optimizar estos factores en el contexto específico del altiplano puneño es esencial para adaptar nueva tecnología a las necesidades locales del altiplano. Estudios previos han demostrado que la calefacción por suelo radiante, alimentada por fuentes de energía renovable, no solo mejora el confort térmico, sino que también reduce significativamente el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (Wang et al., 2022). En el altiplano puneño, donde las temperaturas invernales descienden a niveles críticos, la necesidad de soluciones de calefacción eficientes y sostenibles es fundamental para mejorar la calidad de vida de los habitantes. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), las temperaturas en estas zonas pueden llegar a valores extremadamente bajos, especialmente durante los meses de invierno, lo que afecta significativamente a las viviendas y a la salud de sus ocupantes (SENAMHI, 2023).

Se han añadido a la superficie exterior de tejados aislados, mejorando la eficiencia energética de edificios completos. (CÁLIDO SECO, 2014); (Gentle & Smith, 2015); (Yucra, 2010); (Zhao et al., 2019)). Sin embargo, un verdadero confort térmico implica eliminar el frío, lo cual es más desafiante que mejorar la protección contra el frío (Rodríguez Miranda et al., 2021); (Synnefa et al., 2006).

La introducción de las tecnologías de energía solar ha demostrado ser una de las formas más limpias de producir electricidad en lugar de combustibles fósiles (Li & Ju, 2018); (Su & Zhang, 2017).

A nivel mundial, los sistemas de calefacción por suelo radiante se han reconocido como una alternativa efectiva para la distribución uniforme del calor, utilizando energía renovable de manera eficiente (Hepbasli & Kalinci, 2009); (Julián et al., 2013); (Mahmoudi et al., 2017).

La transferencia de calor en los sistemas de suelo radiante depende de varios factores, como el tipo de materiales utilizados, el espesor del aislamiento, y la configuración del sistema de tuberías (Olesen, 2002); (Lucchi & Lorenzini, 2018); (Yuan et al., 2015). Existen tuberías de cobre por su baja erosión con el contacto con el agua (Valeh-E-Sheyda & Rashidi, 2016). Existe otro material como los polímeros que se han caracterizado por un rápido aumento en las escalas de producción y en la variedad, complejidad de las manufacturas y la diversidad de usos que tienen (Lucchi & Lorenzini, 2018). Los materiales de enfriamiento diurno pueden ayudar a prevenir el sobrecalentamiento al mantener frescas las superficies exteriores de los techos, pero también pueden ayudar a calentar y ayudar al confort de las familias en lugar de friaje (Fortin et al., 2023); (Hinojosa Mateo, 2015); (Vielma, Giovanni; Santos, Rafael; Muñoz, 2013).

Se desarrolla un modelo de transferencia de calor óptima en sistemas de suelo radiante, específicamente adaptados para las viviendas del altiplano puneño, considerando las características climáticas locales y las condiciones de vida de la población. La implementación de un sistema de calefacción eficiente puede tener un impacto positivo no solo en términos de confort, sino también en la sostenibilidad y la salud de los residentes en estas áreas remotas del país (Pérez-Lombard et al., 2008).

En el gélido altiplano puneño, donde las bajas temperaturas causan estragos, nuestra investigación se centró en mejorar la eficiencia térmica de los suelos radiantes. Nuestro objetivo principal fue optimizar los sistemas de suelo radiante incorporando aditivos conductivos

en el concreto. Esto busca ofrecer una solución efectiva para el confort térmico y la habitabilidad en esta región.

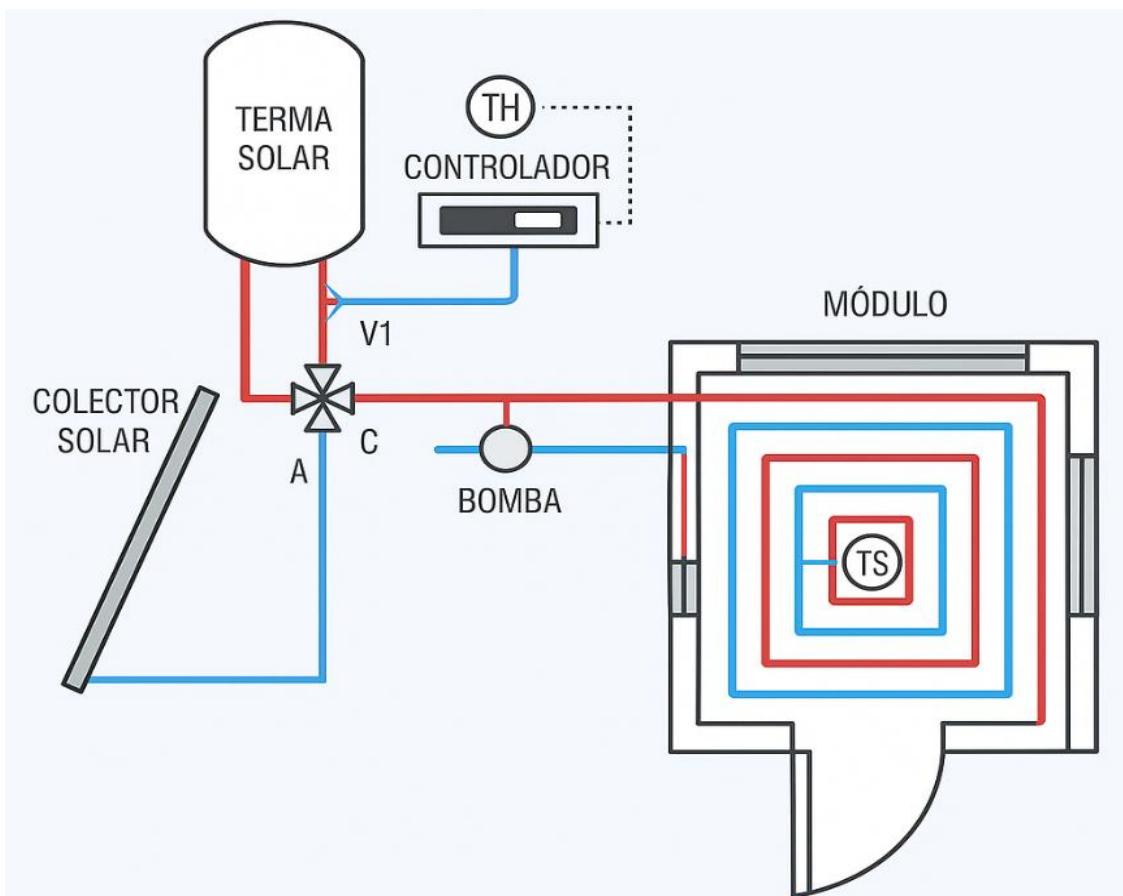
El sistema de suelo radiante

Se observa un sistema de calefacción o refrigeración que utiliza tubos cilíndricos instalados debajo del suelo para distribuir el calor o el frío de manera uniforme en una habitación. Este sistema funciona mediante la circulación de agua caliente o fría, o por resistencias eléctricas, que calientan el

suelo y, por ende, el ambiente. Es adecuado tanto para viviendas como para espacios comerciales y suele estar combinado con fuentes de energía renovables como la energía solar (Alarcia et al., 2017); (Synnefa et al., 2006).

En un buen diseño nos permite ahorrar hasta un 15% de energía. Además, ofrece flexibilidad en el diseño y control individual de temperatura en cada habitación, sin necesidad de radiadores visibles (Standar-Hidráulica, 2022); (yuan et al., 2015) (Figura 1).

Figura 1
Sistema del suelo radiante



Mecanismos de transferencia de calor para el sistema de suelo radiante

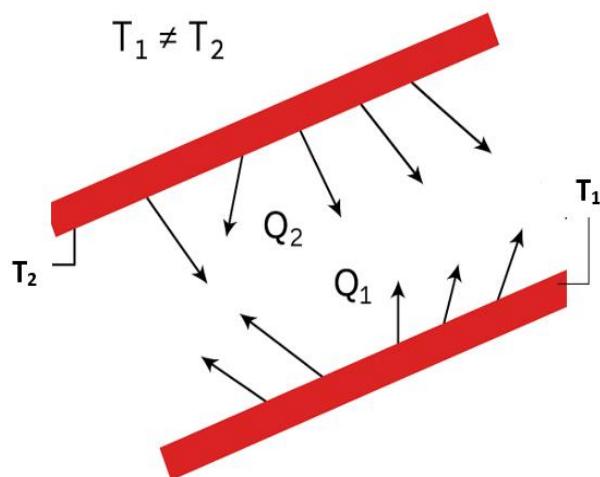
Para Cengel (2011), el calor es una forma de energía que se transfiere de un sistema a otro debido a la diferencia de temperatura entre ambos. En un análisis termodinámico, el interés principal es medir la cantidad de calor transferido mientras

un sistema cambia de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que estudia las tasas de estas transferencias de energía se llama transferencia de calor. La transferencia de calor siempre ocurre desde un medio de mayor temperatura a uno de menor temperatura, deteniéndose cuando ambos medios alcanzan la misma temperatura. Existen tres modos principales de transferencia de calor:

Radiación

Este método de transferencia de calor ocurre debido a la propagación de ondas electromagnéticas, generadas por la interacción entre cuerpos o sustancias que tienen diferentes temperaturas absolutas. De todas las ondas que emite un cuerpo solo son aprovechadas una parte: las que se encuentran dentro del rango de radiación térmica; en otras palabras, las que tienen una longitud de onda comprendida en el rango de 0,1 y 100 micras (Holman, 1999) (Figura 2).

Figura 2
Flujo de calor por radiación.



Nota. Extraído de (Holman, 1999).

La forma de cuantificar la cantidad de calor transferida se realiza con la siguiente expresión:

$$Q_{neto} = A_1 * \sigma * (T_1^4 - T_2^4) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

Q_{neto} = Calor obtenido

T_1, T_2 = Temperatura

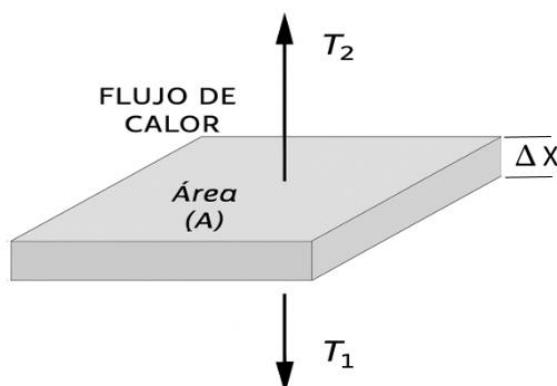
$$\sigma = 5,66697 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \dots \dots \dots \text{(Constante de Stefan-Boltzman)}$$

A_1 = Área

Conducción

Se llama conducción a la transferencia de calor mediante el contacto directo de las partículas de un material con las de otro, sin transferir materia entre los cuerpos, la cantidad de calor que se transfiere mediante la conducción está determinada por la Ley de Fourier, según la cual la velocidad de transferencia del calor a través de un cuerpo es proporcional al gradiente de temperatura que existe en él (Holman, 1999) (Figura 3).

Figura 3
Flujo de calor por conducción para superficies planas



$$Q_x = K * A * \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

Q_x = Calor obtenido

K = Constante térmica del material (cemento = 0,26)

A = Área

T_1, T_2 = Temperatura 1 y 2

Δx = Espesor

Convección

La convección es similar a la conducción, pero se produce cuando un fluido absorbe calor y se desplaza para transferirlo dentro del espacio donde se encuentra. La convección implica el transporte de calor mediante el movimiento de un fluido, ya sea gaseoso o líquido dicha transferencia se da en los términos planteados por la Ley del enfriamiento de Newton, que establece que un

cuerpo pierde su calor a un ritmo proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y sus alrededores (Holman, 1999).

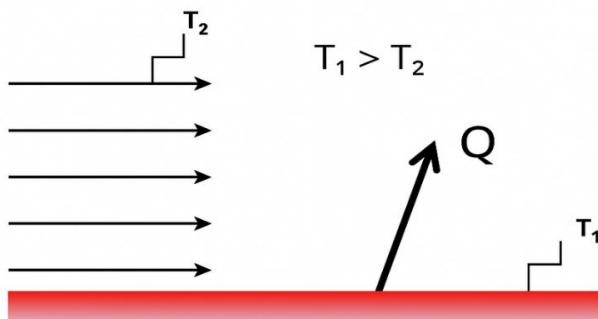
El intercambio térmico del suelo al aire está modelado por el límite de convección. De ahí el coeficiente de transferencia de calor (Canova et al., 2012).

Para poder cuantificar la transferencia de calor por convección, se recurre a la “Ley del Enfriamiento” propuesta por Isaac Newton, (Figura 4).

Figura 4

Transferencia de calor por convección

FLUIDO EN MOVIMIENTO



$$Q = K * A * (T_1 - T_2) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

Q_x = Calor obtenido

K = Constante térmica del material (cemento = 0,26)

A = Área

T_1, T_2 = Temperatura 1 y 2

Métodos

Ámbito o lugar de estudio

El estudio se desarrolló en la provincia de El Collao, enfocándose en las viviendas del Altiplano Puneño, una extensa meseta de gran altitud en el sureste del Perú, con características climáticas frías y secas. La prueba experimental tuvo lugar en una vivienda ubicada en el distrito de Mazocruz a 4 500 m s.n.m. de la misma provincia, donde el frío es extremo principalmente en los meses de mayo, junio, julio y agosto, (Figura 5).

Figura 5

Mapa de Ubicación de Mazocruz



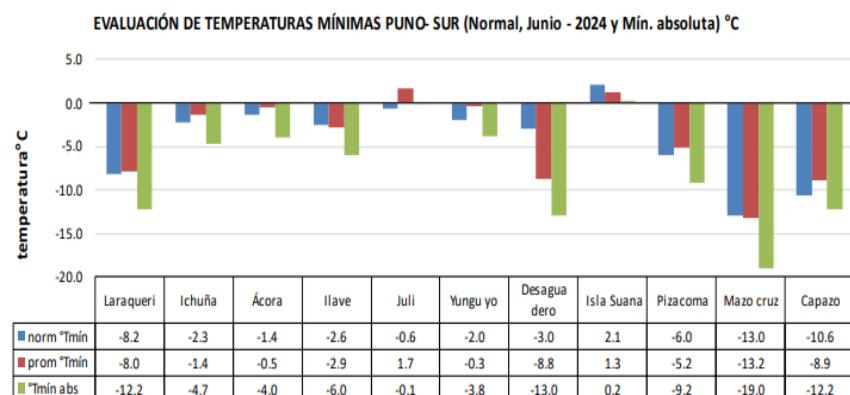
Nota. Tomado de Google Earth

Descripción de métodos

Periodo de estudio o frecuencia de muestreo

Se observa las diferentes temperaturas durante el año 2024 en las zonas más frías del departamento de Puno, el mes de junio se caracteriza por ser este mes donde se presenta la temperatura más baja del año en el altiplano puneño (Figura 6).

Figura 6
Evaluación de temperaturas mínimas Puno para el mes de junio



Descripción detallada de los materiales, insumos e instrumentos utilizados en la ejecución de la investigación.

Preparación de materiales y diseño de mezclas

Selección de agregados:

Sika: Se utilizó 5 % del peso del cemento común tal como lo indica sus especificaciones de uso. Aditivos específicos para mejorar la trabajabilidad y la resistencia del concreto.

Virutas de aluminio: Se utilizó en un 25 % del peso de la arena. Material metálico con alta conductividad térmica.

Cemento conductivo: Se empleó en un peso del 25 % del cemento común. Cemento modificado con aditivos que mejoran la conductividad eléctrica y térmica.

Alambre de cobre: Se empleó filamentos de 5 cm de a una distancia de 5 cm entre filamento y filamento. Fragmentos finos de cobre que actúan como conductores térmicos.

Yeso: Se aplicó un 50 % de yeso y 50 % de cemento como se utilizaba comúnmente en la antigüedad. Mejora la fluidez del concreto y contribuye al control de fraguado.

Preparación de las mezclas:

Se elaboraron cinco diseños de mezclas de concreto, uno para cada agregado, con proporciones constantes de cemento, agua y arena, variando

únicamente el agregado adicional. También se prepara una mezcla de referencia sin agregados especiales (para comparación de transferencia de calor). Cabe destacar que los componentes que integran una mezcla tienen la siguiente relación: arena y grava = 60 % cemento = 20 % y agua = 20 %

Control de calidad:

Se verificó la granulometría, densidad y compatibilidad de los agregados antes de la mezcla.

Elaboración de especímenes

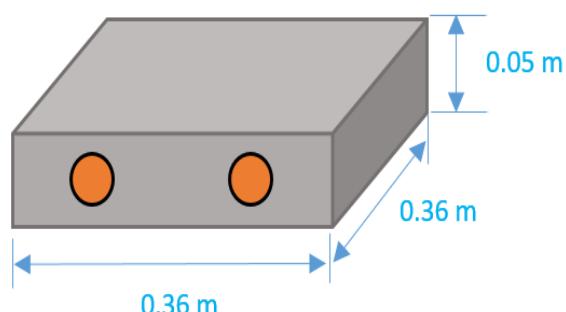
Se Preparan moldes de tipo cubos (0,36 m x 0,36 m x 0,05 m) para elaborar especímenes de concreto.

Insertar tubos de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro por donde circula el agua a diferentes temperaturas.

Verter y compactar cada mezcla en los moldes, asegurando una distribución uniforme.

Curar los especímenes en agua durante 7 días para garantizar el desarrollo adecuado de las propiedades mecánicas y térmicas (Figura 7).

Figura 7
Modelo del experimento y sus dimensiones



Medición de propiedades térmicas

Determinación de la conductividad térmica:

Se utilizó un equipo especializado como el medidor de conductividad térmica (Hot Disk de marca Termtest TLS-100).

Se colocó el espécimen entre placas calefactoras y registrar la transferencia de calor a través del material.

Utilizamos un termómetro digital de marca Extech para realizar mediciones de temperatura al exterior de las placas.

Medición del flujo de calor:

Instalar sensores de flujo de calor en la superficie del espécimen para medir directamente el calor transmitido.

Evaluación de la capacidad térmica específica:

Emplear un calorímetro **diferencial de barrido (DSC)** para medir la capacidad de almacenamiento de calor del concreto modificado.

Simulación del sistema de suelo radiante

Montaje experimental

Construir un prototipo que incluya un sistema de suelo radiante con tuberías de transferencia de calor y una capa de concreto de 5 cm de espesor, utilizando los espécímenes preparados

Condiciones de operación:

Calentar el fluido dentro de las tuberías a una temperatura constante de 40 °C, 60 °C y 87 °C,

monitorear la temperatura en la superficie del concreto y el ambiente circundante.

Análisis comparativo de transferencia de calor entre las placas obtenidas

Comparar los índices de transferencia de calor (conductividad térmica, flujo de calor) entre las mezclas con los diferentes agregados y la mezcla de referencia.

Identificar el agregado que presenta el mayor incremento en la transferencia de calor y analizar su eficiencia térmica en función de su costo y facilidad de implementación.

Validación del método

Realizar pruebas de durabilidad y resistencia mecánica en los espécímenes para garantizar que los agregados adicionales no afecten negativamente las propiedades estructurales del concreto. Verificar que los resultados obtenidos sean consistentes mediante repetición de pruebas.

Variables analizadas

Las variables que intervinieron fueron los cinco diferentes tipos de concreto con sus respectivos aditivos, el tiempo de ingreso de agua a las cañerías de cobre fue entre 10 – 40 min y las 3 diferentes temperaturas de agua que ingresaron a los tubos de cobre fueron 40 °C, 60 °C y 87 °C.

El método usado es de tipo experimental donde se hizo ingresar agua con un caudal constante a diferentes temperaturas (40 °C, 60 °C y 87 °C) para luego tomar el tiempo en que alcanza su máxima temperatura en la superficie de la placa solidificada que tiene las dimensiones de 0,36 m x 0,36 m x 0,05 m y tiene en su interior 2 tubos de cobre con un diámetro de 0,025 m, longitud de 0,36 m (Tabla 1).

Tabla 1
Tipos de concretos para los experimentos.

Concreto N°	Cemento	Arena	Agua	Tipo de Agregado
Concreto 1	Si	Si	Si	Sika
Concreto 2	Si	Si	Si	Virutas de aluminio
Concreto 3	Si	Si	Si	Cemento conductivo
Concreto 4	Si	Si	Si	Alambre de cobre
Concreto 5	Si	Si	Si	Yeso (mezcla diablo)

Prueba estadística aplicada

Se realizó la prueba estadística de ANOVA de un solo factor para poder saber su valor P si proviene de una distribución normal al mismo tiempo saber el grado de significancia (0,05 %).

Resultados

Resultados para incrementar la transferencia de calor con agregados en el concreto del sistema de suelo radiante.

Los 5 tipos de concretos con aditivos y agregados de varios materiales mostraron diferentes comportamientos de transferencia de calor y tiempo de conducción del mismo. Esto implica que los concretos tienen una diferencia respecto a las características de sus propiedades, posterior a esto se tuvo que : A 40 °C todos los concretos muestran incrementos moderados, evidenciando la dependencia lineal entre tiempo y transferencia de calor. **C1** (con aditivo impermeable) registra las menores variaciones máximas de 23 °C a 40 min; la fase

hidrófoba limita la penetración de agua y el flujo convectivo, actuando como aislante para el flujo de calor por sus propiedades del sika hacen que este actúe como un impermeable , para **C2** (con virutas de Al) arranca con la respuesta térmica más baja; las limaduras generan vacíos que reducen conductividad inicial, pero a 40 min alcanza 25 °C por la mayor área de contacto metálico.

C3 (con cemento conductivo) exhibe la mayor sensibilidad: a 60 °C en 40 min sube a 42 °C y a 87 °C en 40 min llega a 50 °C. La matriz dopada con óxidos semiconductores crea caminos continuos que aceleran la difusión de calor, de similar forma **C4** (con alambre de cobre) supera a **C2** y **C5** hasta 30 min; a 87 °C y 40 min alcanza 35 °C. El esqueleto metálico eleva la conductividad, pero la baja fracción volumétrica limita el pico térmico. **C5** (con yeso) responde como **C3** a altas temperaturas 45 °C a 87 °C en 40 min porque la porosidad y la hidratación del sulfato favorecen el transporte de agua caliente y la liberación de calor de reacción (Tabla 2).

Tabla 2

Los 5 concretos a diferentes temperaturas y tiempos

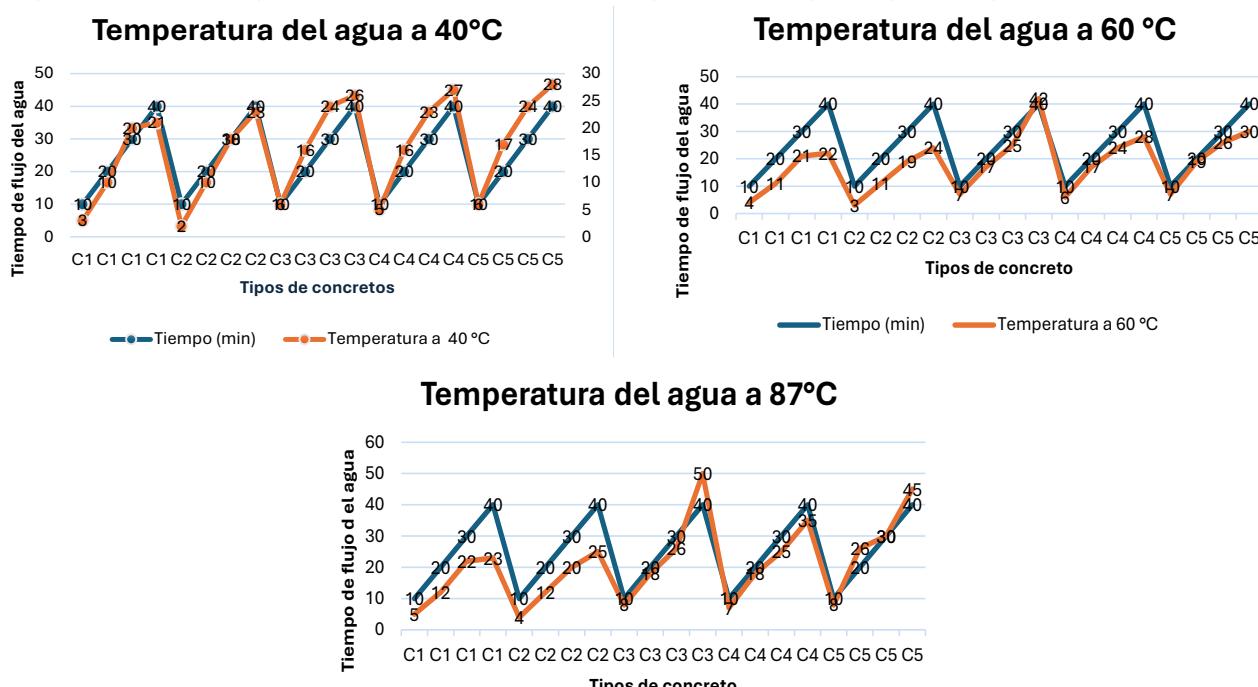
Materiales	Tiempo de transferencia de calor (min)	Temperatura de agua a 40 °C	Temperatura de agua a 60 °C	Temperatura de agua a 87 °C
Concreto con aditivo impermeable (C1)	10	3	4	5
	20	10	11	12
	30	20	21	22
	40	21	22	23
Concreto con virutas de aluminio (C2)	10	2	3	4
	20	10	11	12
	30	18	19	20
	40	23	24	25
Concreto con cemento conductor (C3)	10	6	7	8
	20	16	17	18
	30	24	25	26
	40	26	42	50
Concreto con alambre de cobre (C4)	10	5	6	7
	20	16	17	18
	30	23	24	25
	40	27	28	35
Concreto con yeso (C5)	10	6	7	8
	20	17	19	26
	30	24	26	30
	40	28	30	45

Se muestran tres gráficos de cómo varía la temperatura interna de cinco tipos de concreto frente a distintos niveles de exposición térmica. A 40 °C, el comportamiento es casi lineal, reflejando baja resistencia térmica. A 60 °C y 87 °C, las diferencias se amplifican: concretos con materiales conductores (C3 y C4) evidencian una mayor absorción de calor, mientras que C1 mantiene un perfil más estable. Esto sugiere que,

a mayores temperaturas, las propiedades térmicas del concreto dependen más de la microestructura interna y del tipo de aditivo o agregado metálico incorporado. Cabe destacar que la vida útil del concreto es entre 50 – 75 años según normas del ACI, pero nosotros estimamos que este tipo de placas con aditivos reducirían su vida útil a un 35 % por los aditivos y el flujo de calor que en el existirá (Figura 8).

Figura 8

Comportamientos de los 5 tipos de concreto frente a las diferentes temperaturas y tiempo de ingreso del agua



Se muestran los valores p indicando que los datos provienen de una distribución normal. Por otro lado, se muestran que el tiempo y la temperatura influyen significativamente en la transmisión de calor ($p < 0,05$). Sin embargo, la interacción

concreta*temperatura no es significativo ($p = 0,461$), lo que sugiere que la respuesta térmica frente a la temperatura no varía entre concretos (Tabla 3).

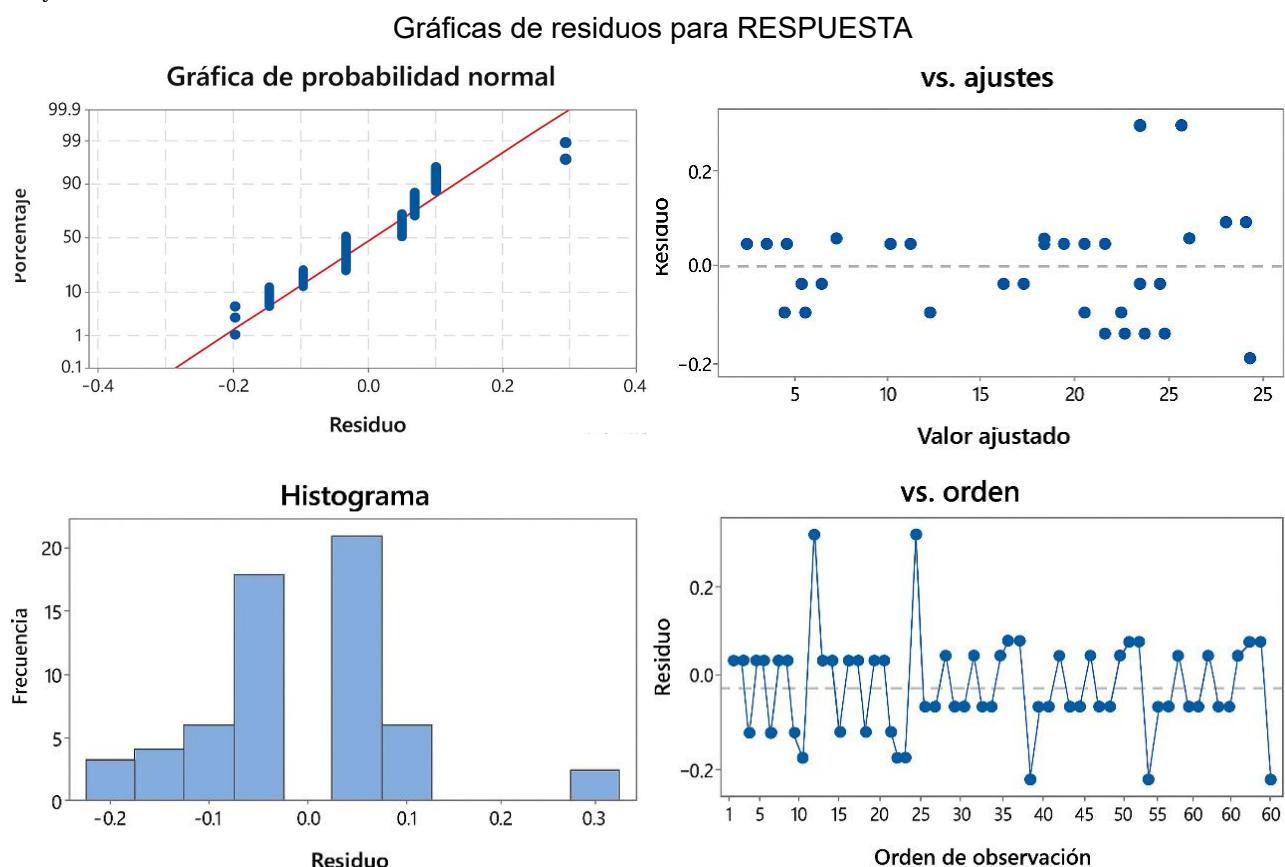
Tabla 3
Análisis de varianza.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	35	4182,25	119,49	4779,71	0,000
Lineal	9	4145,15	460,57	18422,89	0,000
Tipo de concreto	4	265,60	66,40	2656,00	0,000
Tiempo	3	3845,25	1281,75	51270,00	0,000
Temperatura	2	34,30	17,15	686,00	0,000
Interacciones de 2 términos	26	37,10	1,43	57,08	0,000
Tipo de concreto*tiempo	12	36,00	3,00	120,00	0,000
Tipo de concreto*temperatura	8	0,20	0,02	1,00	0,461
Tiempo*temperatura	6	0,90	0,15	6,00	0,001
Error	24	0,60	0,02		
Total	59	4182,85			

Los gráficos de residuos indican que el modelo de regresión ajustado es adecuado y presenta supuestos estadísticos razonables. La gráfica de probabilidad normal muestra que los residuos siguen una distribución aproximadamente normal, al alinearse bien con la línea roja. El histograma respalda esto al mostrar una distribución simétrica centrada en cero. En el gráfico de residuos vs.

valores ajustados, no se observa patrón claro, lo que sugiere homocedasticidad (varianza constante). Finalmente, el gráfico de residuos vs. orden muestra una dispersión aleatoria sin tendencias, lo que indica independencia de errores. En conjunto, las evidencias sugieren que el modelo es estadísticamente válido y los errores no presentan sesgo sistemático (Figura 9).

Figura 9.
Gráficos estadísticos.



Discusiones

Ignacio Álava Gregores (2015), lleva a cabo un estudio comparativo entre tres modelos de simulación (capa activa, Type 653 y Type 712) para evaluar la transferencia de calor en un sistema de calefacción por suelo radiante en una vivienda unifamiliar en Gijón. Utiliza TRNSYS 17, un software de simulación dinámica para analizar sistemas transitorios. Los resultados obtenidos permitieron analizar el rendimiento de cada modelo, pero este modelo se basó solo en base en un software.

Vargas & López (2009), en su investigación utilizan el carburo de silicio (SiC) destaca por su alta conductividad térmica y resistencia a altas temperaturas hasta 1650 °C, ideal para hornos y sistemas de calentamiento. Lo que en nuestra investigación buscamos no es la resistencia a las altas temperaturas, más al contrario que sean pocos resistentes y muy conductivos a la temperatura.

Fu et al. (2023), utilizaron el trihidrato de acetato de sodio (SAT) junto con glicina se ha utilizado como material de cambio de fase en sistemas de calefacción por suelo radiante. La adición de

glicina (12 %) aumentó la temperatura de fusión de SAT de 48,34 °C a 58,38 °C debido a los enlaces de hidrógeno formados entre ellos, haciéndolo adecuado para el propósito; sin embargo, el trihidrato de acetato de sodio es conocido como “Hielo caliente” por su capacidad de liberar calor al cristalizar instantáneamente a partir de una solución sobresaturada y lo malo es su poca accesibilidad a este material nosotros realizamos con materiales existentes en la región altiplánica.

En las investigaciones de Cruz Ramos et al. (2018), utilizan energía eléctrica, pero bien sabemos que tratamos de reducir el consumo de energía eléctrica con energía limpia como es la de la luz solar ellos utilizaron HeidelbergCement innovando con dos nuevos materiales de cables subterráneos. Uno de ellos es CableCem, un material fluido basado en cemento de baja resistencia El segundo es Powercrete, un hormigón especial con alta conductividad térmica (hasta 6 W/ (m.K)).

Sun et al. (2014, indican, que en China el consumo de energía eléctrica está en el rango de 19-24 horas para 2025 y Actualmente, el consumo de electricidad procedente de sistemas de refrigeración de espacios por sí solo representa alrededor del 20 % del consumo eléctrico total del país y otros 20 % para la calefacción de agua, Además, la mayoría de los sistemas de calentamiento de espacios están dimensionados para satisfacer la demanda máxima de calor de espacios, que ocurre durante un período relativamente corto del año, nos parece muy necesario implementar este tipo de calefacción en países industrializados como China .

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que el uso de cemento conductor incrementa significativamente la transferencia de calor en sistemas de suelo radiante. Este hallazgo coincide con lo reportado por (Molina Fuertes et al., 2020), quienes evidenciaron que los materiales con alta conductividad térmica permiten una distribución más uniforme del calor, reduciendo la pérdida energética en edificaciones del altiplano. En el contexto puneño, donde las temperaturas mínimas pueden descender por debajo de los 0 °C.

La adición de yeso y virutas metálicas en las mezclas de concreto mostró una mejora notable en la capacidad de almacenamiento y distribución

del calor, lo que se traduce en un ambiente interior más confortable. Según (Suárez Domínguez, 2024), la incorporación de aditivos de alta conductividad en sistemas de suelo radiante en regiones frías del sur peruano permite alcanzar temperaturas interiores hasta 30 % más estables que con concretos tradicionales.

Conclusiones

La investigación concluye que el empleo de concreto dopado con cemento conductor optimiza significativamente la transferencia térmica en sistemas de calefacción por suelo radiante, alcanzando eficientemente 50 °C en 40 minutos con una entrada de 87 °C. Esta elevada conductividad térmica lo posiciona como el material más eficiente para maximizar el confort térmico en climas fríos de alta montaña como el altiplano puneño. Asimismo, el concreto adicionado con yeso evidenció un comportamiento térmico favorable (45 °C), atribuible a su porosidad y capacidad de retención-calor por hidratación del sulfato cálcico. Ambos compuestos emergen como soluciones térmicamente funcionales y sostenibles, adaptadas a las condiciones extremas de la región andina.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, Aguilar Mamani D.A. (50%), Neira Cutip O.L. (15%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (10%), Arazola Mamani G. (10%); Curación de datos, Aguilar Mamani D.A. (30%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (20%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (15%); Análisis formal, Aguilar Mamani D.A. (30%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (20%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (15%); Adquisición de fondos, Aguilar Mamani D.A. (20%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (20%), Estofanero Jara E.C. (20%), Arazola Mamani G. (20%); Investigación, Aguilar Mamani D.A. (30%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (20%); Metodología, Aguilar Mamani D.A. (30%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (20%); Administración del proyecto, Aguilar Mamani D.A. (30%), Neira Cutip O.L. (15%), Yujra Segales J.R. (15%),

Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (25%); Recursos, Aguilar Mamani D.A. (20%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (20%), Estofanero Jara E.C. (20%), Arazola Mamani G. (20%); Software, Aguilar Mamani D.A. (30%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (20%), Estofanero Jara E.C. (20%), Arazola Mamani G. (10%); Supervisión, Aguilar Mamani D.A. (40%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (10%); Validación, Aguilar Mamani D.A. (40%), Neira Cutip O.L. (15%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (15%); Visualización, Aguilar Mamani D.A. (40%), Neira Cutip O.L. (15%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (15%); Redacción – borrador original, Aguilar Mamani D.A. (40%), Neira Cutip O.L. (15%), Yujra Segales J.R. (15%), Estofanero Jara E.C. (15%), Arazola Mamani G. (15%); Redacción – revisión y edición, Aguilar Mamani D.A. (20%), Neira Cutip O.L. (20%), Yujra Segales J.R. (20%), Estofanero Jara E.C. (20%), Arazola Mamani G. (20%).

Agradecimientos

Agradecemos de forma muy especial a nuestra primera casa de estudio del departamento de Puno a la Universidad Nacional del Altiplano por acogerme en sus aulas y darnos sabiduría.

Conflictos de interés

Los autores, no tiene conflicto de interés de ninguna índole.

Referencias

- Alarcia, J., Castaño, I., & Castellá, J. (2017). *10 claves para diseñar un suelo radiante eficiente y confortable*. 140. <https://www.fegeca.com/viewpdf?sec=Artículos&cod=5&fol=dbarticulos&fil=articulo-tecnico-10-claves-para-disenar-un-suelo-radiante-eficiente-y-confortable.pdf>
- CÁLIDO SECO, Cli. (2014). *Eficacia De Estrategias De Enfriamiento Pasivo*. <https://doi.org/10.41718/RevArq.2014.16.1.10>
- Canova, A., Freschi, F., Giaccone, L., & Guerrisi, A. (2012). The high magnetic coupling passive loop: A steady-state and transient analysis of the thermal behavior. *Applied Thermal Engineering*, 37, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.010>
- Cengel, Y. A. (2011). *Transferencia de Calor y masa. 4TA Edició*. https://www.ingebook.com/ib/NPcd/IB_BooksVis?cod_primaria=1000187&codigo_libro=5254
- Cruz Ramos, D., Navarro Valls, A., & Vargas Serrano, E. (2018). *Hormigón de alta conductividad térmica POWERCRETE®*. 599–608. <https://doi.org/10.4995/hac2018.2018.5380>
- Davis, L., & Gertler, P. (2015). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 5962–5967. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423558112>
- Fortin, R., Mandal, J., Raman, A. P., & Craig, S. (2023). Passive radiative cooling to sub-ambient temperatures inside naturally ventilated buildings. *Cell Reports Physical Science*, 4(9), 101570. <https://doi.org/10.1016/j.xrpp.2023.101570>
- Fu, W., Zhou, W., Lv, G., Zhang, R., Peng, H., Fang, T., Liu, J., Chen, W., & Fang, Y. (2023). Phase change temperature adjustment of CH₃COONa·3H₂O to fabricate composite phase change material for radiant floor heating. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42(September 2022), 102773. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102773>
- Gentle, A. R., & Smith, G. B. (2015). A Subambient Open Roof Surface under the Mid-Summer Sun. *Advanced Science (Weinheim, Baden-Württemberg, Germany)*, 2(9), 1500119. <https://doi.org/10.1002/advs.201500119>
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1211–1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>

- Hinojosa Mateo, A. (2015). *Evaluación de un sistema de calefacción por suelo radiante*. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/25352/PFC_Antonio_Hinojosa_Mateo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Holman, J. P. (1999). Transferencia de calor por Radiación. In I. McGRAW HILL BOOK COMPANY (Ed.), *Transferencia de calor*. <https://biblici.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/07/holman-j-p-8ed1998-transferencia-de-calor.pdf>
- Ignacio Álava Gregores, I. S. R. (2015). *Estudio comparativo de diferentes modelos de simulación de la transferencia de calor en sistemas de calefacción por suelo radiante*. 1–20. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/38482>
- Julián, C., Sergio M., A., & William, A. (2013). Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 285–298. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72243-1](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72243-1)
- Li, B., & Ju, F. (2018). Thermal stability of granite for high temperature thermal energy storage in concentrating solar power plants. *Applied Thermal Engineering*, 138, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.071>
- Lucchi, M., & Lorenzini, M. (2018). Transient analysis of the radiative heating of rotating PVC pipes in a oven for end-forming process. *Applied Thermal Engineering*, 129, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.018>
- Mahmoudi, S. M. S., Salehi, S., & Yari, M. (2017). Three-objective optimization of a novel triple-effect absorption heat transformer combined with a water desalination system. *Energy Conversion and Management*, 138, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.057>
- McLinden, M. O., Seeton, C. J., & Pearson, A. (2020). New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration. *Science (New York, N.Y.)*, 370(6518), 791–796. <https://doi.org/10.1126/science.abe3692>
- MINAM, S., & Puno, Z. (2024). *SENAMHI Boletín informativo*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/04701SENA-139.pdf>
- Molina Fuertes, J. O., Horn Mutschler, M. J., & Gómez León, M. M. (2020). Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar. *Tecnia*, 30(1), 70–79. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.841>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Rodríguez Miranda, S., Martínez Alvarez, O., & González Nava, C. (2021). Evaluación por simulación dinámica del comportamiento térmico en una casa interés social con la incorporación de estrategias de arquitectura bioclimática en Guanajuato, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(1), 1–13. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.004>
- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- SENAMHI. (2023). *Boletín regional de información Puno*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/04701SENA-133.pdf>
- Standar-Hidraulica, S. (2022). *Manual técnico Sistema completo de calefacción por suelo radiante*. https://d7rh5s3nxmpy4.cloudfront.net/CMP5654/files/MANUAL_SUELO_RADIANTE_2022_%285%29.pdf
- Su, W., & Zhang, X. (2017). Thermodynamic analysis of a compression-absorption refrigeration air-conditioning system coupled with liquid desiccant dehumidification. *Applied Thermal Engineering*, 115, 575–585. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.071>
- Suárez Domínguez, E. J. (2024). Optimización Sostenible de Propiedades Térmicas y

- Mecánicas en Concreto mediante Aditivos Naturales: Un Enfoque Molecular. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 16, 109–118. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i16.283>
- Sun, X., Zhang, Q., Medina, M. A., & Lee, K. O. (2014). Energy and economic analysis of a building enclosure outfitted with a phase change material board (PCMB). *Energy Conversion and Management*, 83, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.035>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>
- Valeh-E-Sheyda, P., & Rashidi, H. (2016). Inhibition of corrosion in amine air cooled heat exchanger: Experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 98, 1241–1250. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2015.12.101>
- Vargas, F., & López, E. (2009). Silicon Carbide Tubes Fabrication for Radiant Furnaces and Heating Systems. *Año*, 76, 233–242. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/da8ccc11-4613-4a2f-8e89-192c22b91f69/content>
- Vielma, Giovanni ; Santos, Rafael ; Muñoz, J. (2013). Análisis numérico simple del fenómeno de transferencia de calor en tuberías enterradas. *Ciencia e Ingeniería*, 35(1), 23–28. <https://www.redalyc.org/pdf/5075/507550624003.pdf>
- Wang, S., Qu, R., Zhang, X., Li, Y., & Chen, J. (2022). Thermal performance analysis of ground source heat pump system for low-temperature waste heat recovery storage. *Case Studies in Thermal Engineering*, 35(April), 102131. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102131>
- Xue, Z., Zhong, Z., Zhang, B., Zhang, J., & Xie, X. (2017). Potassium transfer characteristics during co-combustion of rice straw and coal. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1418–1424. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2017.06.116>
- Yuan, X., Ji, B., Yuan, Y., Ikram, R. M., Zhang, X., & Huang, Y. (2015). An efficient chaos embedded hybrid approach for hydro-thermal unit commitment problem. *Energy Conversion and Management*, 91, 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.021>
- Yucra, R. C. (2010). Estudio para la climatización de la piscina y la producción de agua caliente sanitaria ACS con energía solar de la UNAP. *IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII-SPES)*, 1–5. <https://es.slideshare.net/slideshow/exposicion-iv-claexviispes2010/7999600>
- Zhao, D., Aili, A., Zhai, Y., Xu, S., Tan, G., Yin, X., & Yang, R. (2019). Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. *Applied Physics Reviews*, 6(2). <https://doi.org/10.1063/1.5087281>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>