

Comparación de materiales de almacenamiento de calor sensible locales y de bajo costo para aplicaciones de media temperatura. Caso de estudio: Yucatán.



Ricardo A. Mena Pérez, Rodrigo A. Maldonado Patrón, Danna M. Cortés Chablé,
A. Cristina Valencia Rosado, Renato E. Castillo Marrufo

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán
Almacenamiento de Energía

RESUMEN

En la actualidad, el almacenamiento térmico de energía ha ganado gran relevancia debido a la tendencia por abandonar los combustibles fósiles; sin embargo, el alto costo de los materiales desarrollados para este tipo de sistemas no permite su implementación diversificada. Las principales alternativas que se han estudiado son las rocas, el concreto y las arenas, cada uno de los cuales presenta sus ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. Es necesario designar condiciones de frontera en el sistema para así determinar el comportamiento que tendrá el sistema, una vez designadas las condiciones de frontera se puede realizar el estudio de los fenómenos que afectan en la transferencia de calor. Se simularon 3 materiales de almacenamiento térmico, grava de piedra caliza, arena de playa y arena de cuarzo, de igual forma se utilizaron 2 fluidos térmicos, aire y aceite. Para realizar la comparación entre distintos tipos de arena se utilizó arena de cuarzo, esta última solo en el caso de aire como fluido. Las rocas o grava presentaron los mejores resultados de la evaluación del TESS propuesto dado que son materiales muy densos y cuentan con una buena conductividad térmica. La arena de playa, a pesar de ser un material abundante en sitios cercanos a la costa, no puede considerarse como una alternativa ideal para TSM, ya que no presenta una buena conductividad térmica, lo cual afecta en los tiempos de carga y descarga. En general, se puede decir que la conductividad térmica es un factor determinante en los tiempos de carga y descarga del TSM, y es preferible emplear materiales que también sean de diámetros pequeños, para mejorar la transferencia de calor en los ciclos de carga y descarga. Por otra parte, los resultados obtenidos de las simulaciones mostraron una buena distribución de la temperatura en el interior de los TSM analizados. Finalmente, se determina que es necesario realizar una simulación apropiada de transferencia de calor y flujo turbulento para así poder obtener indicadores más importantes como el factor de utilización, los tiempos de carga y descarga, la temperatura de salida del HTF y la capacidad almacenada en función de la transferencia de calor con un flujo turbulento.

Nomenclatura

<i>TESS</i>	<i>Sistema de almacenamiento de energía térmica</i>	ρ	<i>Densidad</i>
<i>TES</i>	<i>Almacenamiento de energía térmica</i>	\dot{m}	<i>Flujo másico</i>
<i>TSM</i>	<i>Material de almacenamiento térmico</i>	Re	<i>Número de Reynolds</i>
<i>HTF</i>	<i>Fluido de transferencia de calor</i>	v	<i>Viscosidad cinemática</i>
<i>PCM</i>	<i>Material de cambio de fase</i>	μ	<i>Viscosidad dinámica</i>
<i>CPC</i>	<i>Colector parabólico compuesto</i>	g	<i>Gravedad</i>
<i>PTC</i>	<i>Colector cilíndro-parabólico</i>	D	<i>Diámetro</i>
<i>PDC</i>	<i>Colector de plato parabólico</i>	\vec{V}	<i>Velocidad</i>
<i>CFD</i>	<i>Mecánica de fluidos computacional</i>	P	<i>Presión</i>
<i>PP</i>	<i>Polipropileno</i>	V	<i>Volúmen</i>
\dot{Q}	<i>Flujo de calor</i>		
C_p	<i>Capacidad calorífica</i>		
k	<i>Conductividad térmica</i>		
T	<i>Temperatura</i>		

1. Introducción

En la actualidad, el uso de energías limpias ha obtenido gran relevancia debido a la escasez y encarecimiento de los combustibles fósiles (CF's), así como a las afectaciones ambientales que estos provocan. Una de las grandes limitantes para lograr la transición de los CF's a energías limpias es su dificultad de almacenamiento por largos períodos pero principalmente por sus altos costos.

De acuerdo con el Departamento de Energía de los E.E.U.U. (2016), el costo de la energía de los actuales sistemas de energía solar fotovoltaica es de aproximadamente 0.15-0.20 \$USD/kWh, en comparación, el costo de la energía con CF's es de 0.05-0.06 \$USD/kWh (Xu et al. 2017). Por otro lado, el costo de la energía térmica solar con almacenamiento puede elevarse hasta los \$30 USD/kWh. Por esta razón es que en los últimos años se han estudiado distintos tipos de almacenamiento energético, tanto eléctrico como térmico.

En México, el uso final de la energía para el sector industrial no es tanto en forma de electricidad sino en forma de calor, el cual representa el 67% de este sector (figura 1) o el equivalente al 21% del consumo nacional de energía en 2016 (Solar-Payback, 2018). En este sentido, existe un mayor potencial y necesidad de desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica (TESS) que permitan la implementación de las energías renovables en el sector industrial, el cual consume el 31.8% de la demanda total de energía en México (SENER, 2018).

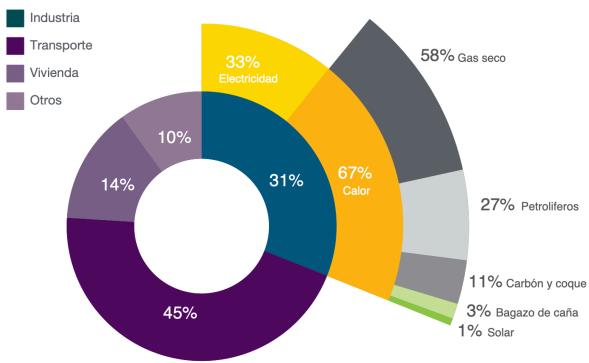


Figura 1. Consumo energético de México por sector en 2016 (Solar Payback, 2018).

El almacenamiento térmico de energía es considerado uno de los más prometedores ya que este permite de forma eficaz tener un suministro continuo de la energía, al regular o eliminar el desfase entre la generación y su demanda, a un bajo costo (Tiskatine et al, 2017).

1.1 Objetivos

En este sentido, el estudio y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica (TESS) adaptados a las necesidades de la industria y que sean de bajo costo es de gran importancia para poder impulsar la transición energética en el país. Por esta razón el objetivo de este trabajo es:

Describir los fenómenos más importantes que gobiernan la transferencia de calor en un TESS de calor

sensible y diseñar y simular una propuesta de sistema utilizando materiales de la región bajo condiciones preestablecidas.

Asimismo, se plantearon 3 objetivos específicos orientados al logro del objetivo general:

1. *Determinar los materiales óptimos para el diseño del sistema bajo las condiciones de operación preestablecidas.*
2. *Diseñar y dimensionar el tanque de almacenamiento térmico.*
3. *Realizar simulaciones de transferencia y almacenamiento de calor para analizar la factibilidad del sistema.*

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el fin de comparar diferentes materiales de almacenamiento térmico (TSM) y los diferentes diseños para el tanque de almacenamiento, para así poder proponer un diseño propio.

2. Antecedentes

Muchos autores han desarrollado trabajos y estudios sobre el almacenamiento de energía térmica (TES) pero la gran mayoría se enfoca en aplicaciones de bajas temperaturas, principalmente orientadas al calentamiento de agua (100°C) para el sector residencial; sin embargo, estos han abordado diferentes ámbitos de la transferencia de calor con el fin de optimizar el diseño del tanque de almacenamiento y han experimentado con diferentes materiales y fluidos de transferencia de calor (HTF).

2.1. Aplicaciones de baja temperatura

Nordbeck et al. (2020) estudiaron un TESS con cemento ahogado en agua para llenar los huecos de aire y aumentar la capacidad de almacenamiento, su sistema tiene una hélice de tubos de compuesto Al-PE (aluminio-polietileno) para el intercambio de calor dentro de un tanque bien aislado de PP (figura 2). Por su aplicación para uso doméstico, la máxima temperatura que alcanza es de 90°C.

Shen et al. (2019) realizaron una investigación experimental con un tanque de almacenamiento con varillas verticales como intercambiadores de calor y una temperatura objetivo de 80°C. El material del tanque fue PP de 6 mm ($k = 0.1 \text{ W/mK}$) con dimensiones internas de 0.5 m de altura y 0.35 m de diámetro; dentro habían 5 tubos verticales de cobre de 19 mm de diámetro y 1 mm de grosor; el tanque se encontraba recubierto con 25 mm de capas de aislante con $k = 0.036 \text{ W/mK}$.

M. Elashmawy (2020) condujo un experimento para analizar el desempeño de un sistema de destilación de agua de tipo PTC usando grava fina ($C_p = 0.754 \text{ kJ/kgK}$) directamente en el tubo de colección como material de almacenamiento. Con esto obtuvo un incremento en la eficiencia térmica del sistema de hasta el 36.34%.

Se realizó un estudio por Mahfoudi et al. (2014) donde se emplea arena como TSM dentro de un tanque cúbico con 16 tubos de pared delgada acomodados verticalmente en su interior. Las características de la arena fueron: $C_p = 0.835 \text{ kJ/kgK}$, $k = 1 \text{ W/mK}$ y $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$. Tras la ejecución de las prue-

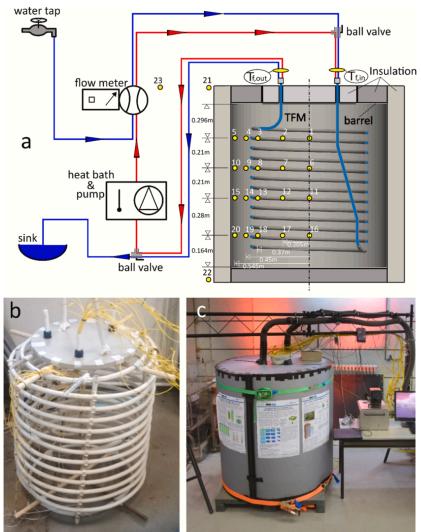


Figura 2. a) Esquema del sistema en carga (rojo) y descarga (azul). b) Armado interno del intercambiador de calor. c) Prototipo funcional en laboratorio.

bas se encontró que con 5 horas de carga en régimen permanente la arena alcanzaba la temperatura objetivo de 80°C.

2.2. Aplicaciones de media temperatura

Sodhi et al. (2018) realizaron un análisis bidimensional de un TES de calor latente con Nitrato de sodio como PCM. El sistema consiste en un tanque cilíndrico con tubos metálicos verticales por los cuales pasa aire a 357°C como HTF y una velocidad de 8.96 m/s. El análisis se basó en determinar la mejor distribución de los tubos y se encontró que mientras mayor sea su número, mejor se distribuye el calor, llegando hasta 25 tubos en el tanque. A flujo constante, el tanque se logró cargar hasta los 327°C en 4 horas. Se encontró también que la transferencia de calor en la descarga está dominada por la conducción y es relativamente más lento que el proceso de carga debido a la baja conductividad térmica del PCM. La figuras 3a-3b muestran la mejora en la transferencia de calor durante los procesos de carga y descarga al utilizar un gran número de tubos. En la figura 3b se observa que la conductividad del material de almacenamiento es importante ya que de no ser lo suficientemente alta, una parte de la energía podría no ser aprovechada al quedar contenida en las zonas lejanas a los tubos de intercambio.

Agnes et al. (2018) analizaron el desempeño económico y de operación del uso de concreto como material de almacenamiento térmico en conjunto con sistemas de concentración CPC y PTC para temperaturas menores a 180°C. Su estudio estuvo enfocado a la implementación en un proceso de pasteurización que requiere temperaturas de 75°C. Entre sus resultados obtuvieron que la implementación de almacenamiento puede reducir el tiempo de recuperación de la inversión a la mitad, siendo de 1 año para los sistemas tipos CPC y de 5 años para los tipo PTC, y se señala que para aplicaciones menores a 150°C es más factible usar sistemas CPC y que para las mayores a 150°C, un sistema PTC.

En un estudio realizado por Kiwan y Soud (2018) se evaluó el desempeño de la combinación arena-basalto como TSM en diferentes concentraciones para su implementación en un sistema de concentración solar que alcanza los 300°C. Dado que

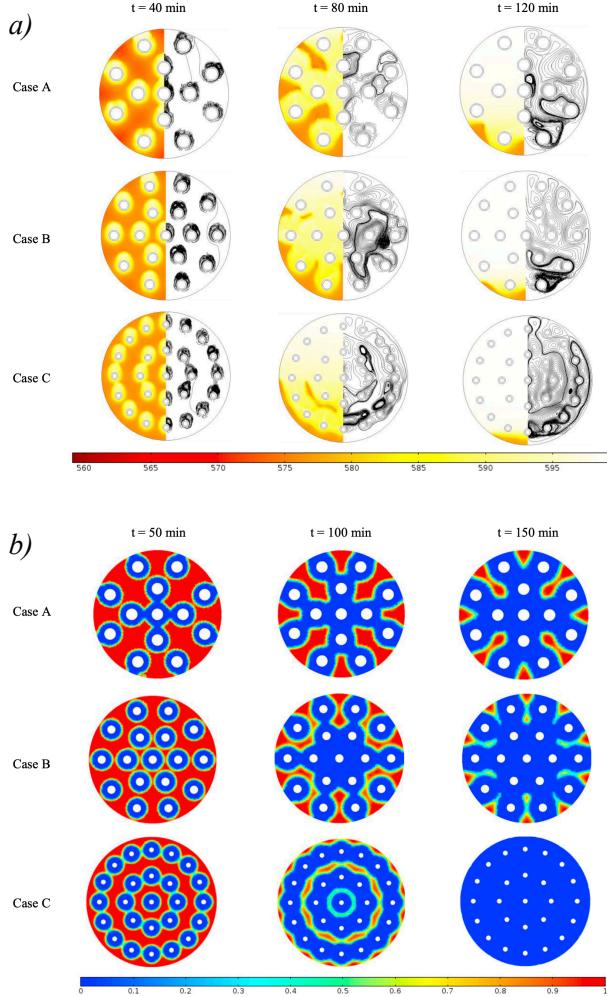


Figura 3. a) Comparación del proceso de carga con diferente número de tubos a 40, 80 y 120 min. b) Comparación del proceso de descarga con diferente número de tubos a 50, 100 y 150 min.

este sistema no emplea HTF, se estudia también el uso de diferentes números de varillas, ya que estas son las que transfieren el calor desde la superficie de concentración hacia el interior del tanque. Para su evaluación, introducen el concepto de *factor de utilización*, el cual representa la porción o fracción del volumen del tanque que alcanza los 300°C, es decir, la parte útil; en este sentido, el factor de utilización se usó como medida de la efectividad de las varillas conductoras. Entre sus resultados hallaron que incrementar el número de varillas no tiene un gran impacto en el factor de utilización, por el contrario, incrementar la concentración de basalto produce un mayor incremento en el factor de utilización. En conclusión, el sistema mostró el mejor desempeño empleando 5 varillas conductoras y una mezcla de arena-basalto 75%, con lo que se obtuvo un factor de utilización del 73%.

Ghoreishi et al. (2018) realizaron una simulación y evaluación económica de un depósito de piedra caliza como TES que aprovecha el calor residual de una planta de generación a base de diesel. El sistema debe poder almacenar la energía por un período largo dado que se propone usar para la calefacción de hogares durante el invierno. La temperatura de los gases de escape de la planta es de 400°C. Se obtuvo que tras aproximadamente 120 días de carga, el aire de salida iguala la temperatura del aire de entrada pero este decrece rápidamente conforme

se inicia la descarga, por lo cual se concluye que es necesario implementar aislamiento térmico y probar diferentes TSM.

2.3. Aplicaciones de alta temperatura

Xu et al. (2017) realizaron una simulación de una planta CSP de 600 MW en la cual se utilizaron concreto, arena y arena saturada como TSM, empleando aceite térmico como HTF. El sistema operaba a una temperatura mínima de 470°C y tuvo un tiempo de carga y descarga de 6 horas. En los resultados se obtuvo que el concreto sin fisuras es el mejor material de entre los evaluados para almacenar energía a altas temperaturas; sin embargo, debido a las fracturas que se generan después de cierta cantidad de ciclos de carga y descarga, el concreto pierde su efectividad, por lo que se concluye que la mejor opción para períodos menores a 6 horas es la arena saturada debido a que su almacenamiento térmico puede ser un 4.6% mayor que el almacenamiento del concreto con fisuras, como se muestra en la figura 4.

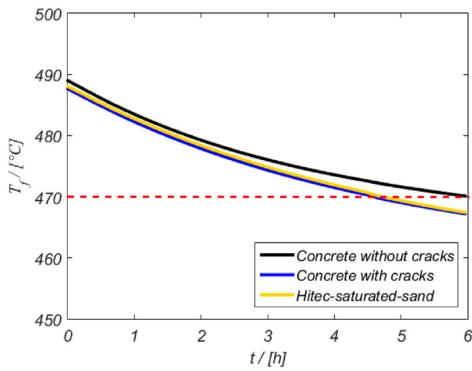


Figura 4. Comparación del proceso de descarga de diferentes materiales para el almacenamiento térmico en un periodo de 6 horas.

En el estudio realizado por Schlipf et al. (2015) se evaluó un tanque de almacenamiento tipo “packed bed” en el cual se hacía fluir aire caliente para estudiar la distribución de temperatura en la arena o la grava, los cuales servían como TSM. El estudio tuvo un enfoque en la transferencia de calor en las partículas del TSM, para ello, se usó un modelo de caparazones concéntricos (figura 5). En este sentido, si la superficie de las partículas se calienta muy rápido, las capas más internas no alcanzarán a calentarse ya sea porque el material posee baja conductividad térmica o porque el diámetro de la partícula es muy grande. Partículas con un número de Biot menor a 0.1 muestran prácticamente una distribución uniforme de la temperatura en cualquier instante, lo cual resulta en una buena capacidad de almacenamiento. Para lograr esto, se usaron partículas de 0.2 mm de diámetro promedio (0.5 mm máximo) de arena y de 1 a 2 mm de diámetro de grava con un alto contenido de cuarzo. Entre sus resultados obtenidos señalan que los materiales granulados poseen un buen potencial como TSM, ya que la distribución de la temperatura en las piedras se da rápidamente y por ende la energía térmica puede entrar o salir del material de la misma manera. La figura 6 muestra los resultados de su evaluación, indicando que la grava, a pesar de su mayor diámetro, responde más rápido a los cambios de temperatura debido a su alto contenido de cuarzo.

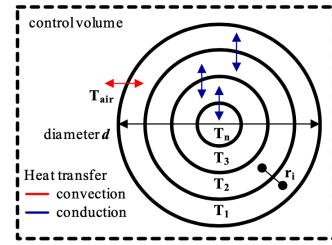


Figura 5. Modelo de caparazones empleado para simular el comportamiento de la temperatura.

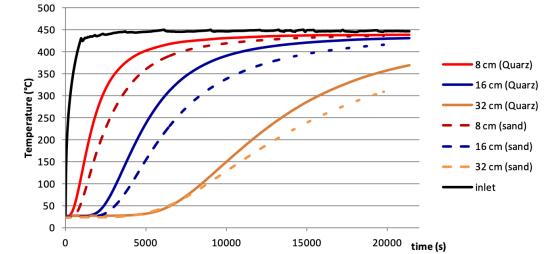


Figura 6. Comparación entre la arena y grava del comportamiento de la temperatura a diferentes distancias de la cama (packed bed).

Warerkar et al. (2009) respaldan en su estudio que para granos de arena con diámetros menores a 2 mm, el número de Biot es menor que 0.01, por lo tanto, no se considera un flujo de calor dentro de la partícula sino como un medio isotrópico. Asimismo, concluye que el tamaño de grano óptimo para la transferencia de calor es de 2 a 3 mm.

Bataineh y Gharaibeh (2018) llevaron a cabo la simulación y optimización de un tanque de almacenamiento de calor sensible usando basalto, sal del Mar Muerto y concreto como TSM, como alternativas a las sales fundidas. El análisis estuvo enfocado en el comportamiento transitorio y la capacidad de alma-

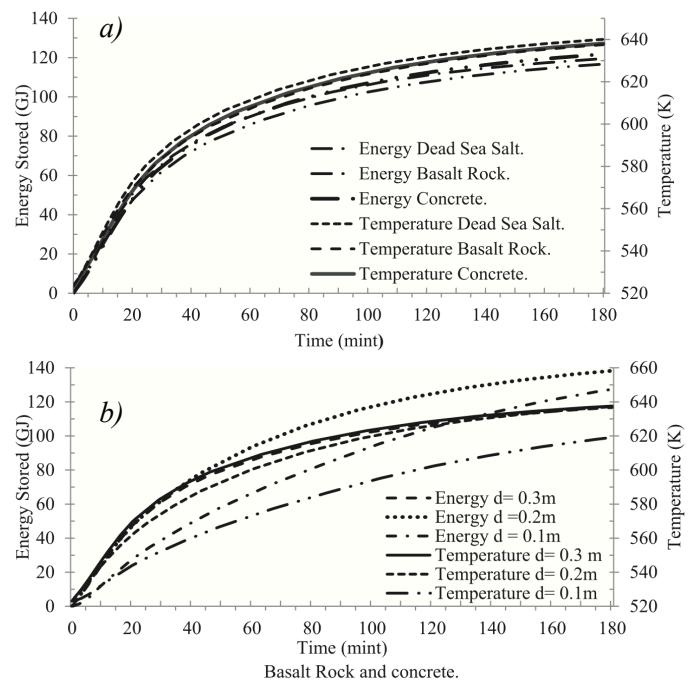


Figura 7. a) Comparación del desempeño térmico y energético del sistema con los diferentes TSM, b) influencia de la variación del diámetro de los tubos en la energía almacenada y la temperatura alcanzada (Bataineh, 2018).

cenamiento térmico del sistema, en un rango de temperaturas entre 523-673K, así como en la determinación de un radio y número de tubos intercambiadores de calor. La figura 7a muestra el comportamiento de la energía almacenada y la temperatura alcanzada por el sistema durante el período de carga, de la cual se observa que tras 180 minutos, el TSM alcanza más del 90% de la temperatura de entrada del HTF; los 3 materiales propuestos presentan altos desempeños, la sal se desempeña mejor en la temperatura pero el concreto demuestra una mejor capacidad de almacenamiento energético. Aunque se concluye que el basalto y la sal son los mejores candidatos para reemplazar las sales fundidas dado sus bajos costos y fácil manipulación. En la figura 7b se observa que diámetros grandes del tubo favorecen la transferencia de calor y por ende se alcanza más rápido la temperatura objetivo, pero por el contrario, un incremento en el diámetro del tubo reduce el volumen de almacenamiento y por ende, la capacidad de almacenamiento baja.

3. Selección de los materiales

Para TSM de calor sensible, de acuerdo con Tiskatine et al., las características más deseables son: alta densidad de energía (kJ/m^3), buena conductividad térmica (W/mK), estabilidad y alta resistencia a daños por ciclos de carga y descarga, bajas emisiones de CO_2 , gran disponibilidad a bajo costo, bajo coeficiente de expansión volumétrica (K^{-1}) y amplio rango de temperaturas de operación. Además, se debe procurar tener buena transferencia de calor entre el TSM y el HTF, así como una buena compatibilidad con el material del contenedor (2017). Los materiales diseñados específicamente para aplicaciones de almacenamiento de calor sensible explotan lo más posible sus propiedades para poder cumplir con estos puntos. Uno de los TSM de calor sensible más utilizados son las sales fundidas; no obstante, sus altos costos han motivado al uso de materiales locales que cumplan con la mayoría de los puntos señalados anteriormente.

De la revisión bibliográfica se puede notar que los materiales más comunes como alternativas de bajo costo de TSM son: rocas, concreto y arenas. Asimismo, el aire es muchas veces preferido como HTF en lugar de aceites térmicos, dados sus altos costos, cuando el diseño del TESS lo permite.

En el presente trabajo, se realiza la comparación de 3 TSM y 2 HTF como alternativas locales de bajo costo para el sistema propuesto. Estos son: arena de aragonita, arena de cuarzo y grava de piedra caliza; y aire y aceite térmico, respectivamente.

A pesar de que en la literatura se ha encontrado que el concreto es una buena alternativa como TSM de bajo costo, este sufre de complicaciones cuando se trabaja a temperaturas medias y altas. En el estudio realizado por Xu et al. (2017) se simularon concreto, concreto con fracturas y arena saturada con aceite térmico para comparar sus capacidades de almacenamiento. Se compararon dos concretos debido a que este presenta fracturas conforme se le somete a ciclos de cargas térmicas, es decir, deja de considerarse como un volumen continuo ya que entre las fracturas ahora existirá una porción de aire, lo que reduce su conductividad térmica. Por esta misma razón, la arena simulada se encontraba saturada con aceite térmico ya que por su alta porosidad, dificulta la transferencia de calor. La simulación dio como resultado que la arena cuenta con una ma-

yor capacidad de almacenamiento que el concreto con fracturas, lo que significa que puede proveer temperaturas de salida más altas y por un mayor tiempo, como se observa en la figura 4.

Asimismo, otro factor importante a considerar, es que la arena cuenta con una alta durabilidad, lo que la hace una buena opción para el almacenamiento térmico, en comparación con el concreto, puesto que este posee una menor vida útil (Xu et al. 2017). Aunque, las temperaturas del concreto con fracturas no están muy lejos de las de arena saturada en la gráfica de la figura anterior.

Por otro lado, dado que se plantea utilizar materiales locales, no es posible estandarizar sus propiedades para cualquier ubicación sino que depende de la composición característica de cada sitio, esto afecta principalmente a la arena y la grava (rocas). A continuación, se presenta el proceso que se llevó a cabo para determinar las propiedades de cada uno de los materiales propuestos, que luego se utilizarán en las simulaciones.

3.1 Selección de la roca

En el estudio de Tiskatine et al. (2017), se presentan las características de diferentes tipos de rocas como materiales de almacenamiento térmico. Las rocas, al tener un valor alto de k , se calientan en un menor tiempo en comparación con otros materiales. En dicho trabajo, se realizaron pruebas de laboratorio con temperaturas de 25 a 650°C para estudiar el comportamiento térmico de diferentes rocas. En la figura 8 se observa la imagen térmica de un horno y dentro una muestra de roca, se puede ver que después de 10 min, ésta alcanza una temperatura de casi 300°C, lo que demuestra su alto valor de k . Además, se comprobó que a medida que aumenta la temperatura, el calor específico de la roca también aumenta, aunque, también se da una reducción en la conductividad térmica (figura 9).

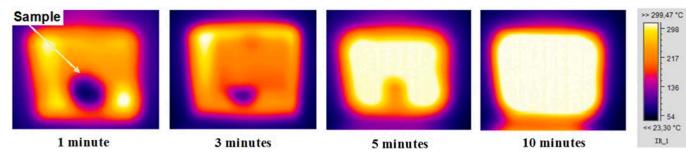


Figura 8. Imágenes en infrarrojo de la evolución térmica de una muestra de roca dentro de un horno de fundición (Tiskatine, 2017).

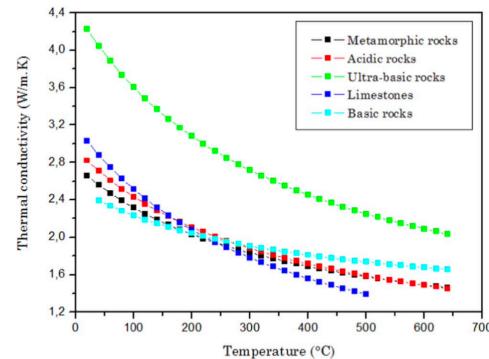


Figura 9. Conductividad térmica de diferentes rocas en función de la temperatura (Tiskatine, 2017).

Cabe mencionar, que este autor afirma que las rocas y minerales presentan desgastes después de ser sometidos a altas tem-

peraturas (650°C), lo que ocasiona fracturas en el material tras algunos ciclos de carga. Se pueden presentar tres tipos de daño (figura 10) en el material por altas temperaturas: desintegración parcial; fracturas y fragilidad; blanqueamiento y debilitamiento superficial.

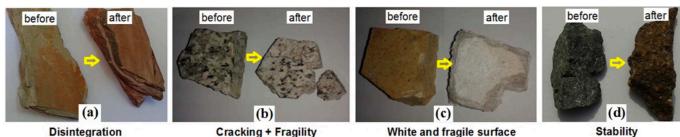


Figura 10. a) Daño por desintegración parcial; b) daño por fracturas y fragilidad; c) daño por blanqueamiento y debilitamiento superficial (Tiskatine, 2017).

Por otra parte, se encontró en dicho estudio que la composición mineral así como el grado de impurezas de las rocas tienen grandes afectaciones en las propiedades térmicas de las roca. De acuerdo con las conclusiones de este autor, para que las rocas puedan ser un gran candidato a TSM, estas deben tener un alto contenido de cuarzo ya que este mineral permite el aumento de la conductividad térmica y reduce el riesgo a sufrir daños. En la figura 11 se muestra que los materiales con alto contenido de cuarzo, como la cuarcita y la arenisca, presentan altos valores de conductividad y capacidad térmica.

Una de las rocas más abundantes en la región de Mérida, Yucatán es la roca caliza, por esta razón, para las simulaciones, ésta fue seleccionada como TSM en forma de grava, ya que, de acuerdo con las referencias consultadas, a menor tamaño mejor se da la transferencia de calor. En la tabla 1 se encuentran las propiedades de la roca caliza (limestone).

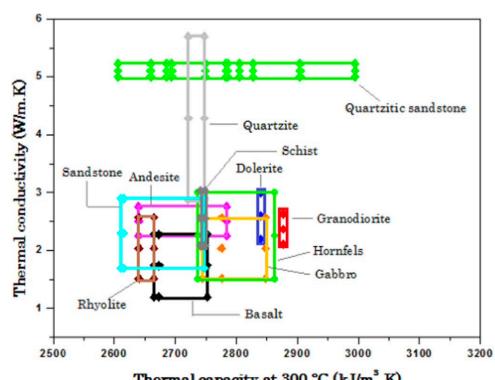


Figura 11. Comparación de las propiedades térmicas de diferentes rocas (Tiskatine, 2017).

3.2 Selección de la arena

Cuando se habla de arenas, muchos trabajos se enfocan en arena de desierto o arena con un alto contenido de cuarzo; sin embargo, en este trabajo se pretende evaluar el uso de materiales disponibles localmente, tal es el caso de la arena de playa. La arena de desierto y la de playa difieren principalmente en que la primera se origina por la erosión de las rocas con un alto contenido de cuarzo, en cambio, la arena de playa puede provenir de la misma fuente en rocas submarinas o de la erosión de las conchas de calcio de animales marinos (Castro, 2013), aunque su composición depende también de la ubicación geográfica.

Para analizar la composición y características de la arena local, se tomaron muestras de la playa de Chuburná Pto., Yucatán, México. De acuerdo con Chen et al. (2006), la composición química de la arena de Cancún, Q. Roo, México, es carbonato de calcio (CaCO_3) proveniente de la erosión o fragmentación de la aragonita; este material es común encontrarlo en las conchas de la mayoría de moluscos y en el esqueleto de corales. Dada la relativa cercanía entre las dos playas, se supone que la arena recogida en las muestras tendrá la misma composición. La conductividad térmica de la aragonita fue determinada por E. Robertson (1988) y se muestra en la figura 12 que su valor varía entre los 2 y 1 W/mK en un rango de 300 a 800K.

Asimismo, se consultaron varios autores que hay utilizado distintos tipos de arenas como TSM; con base en ello y sabiendo ya el valor de la conductividad de la aragonita, se seleccionó

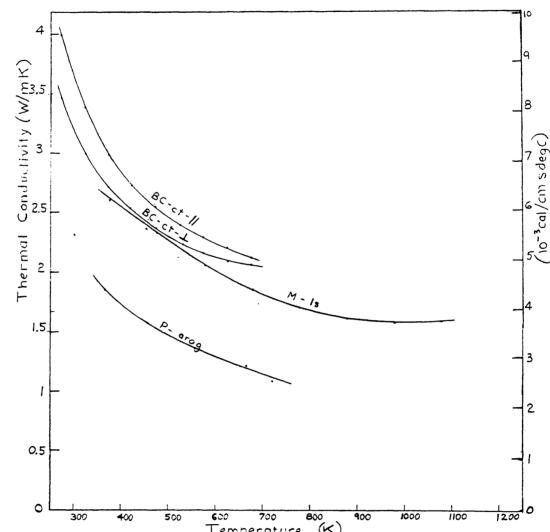


Figura 12. Variación de la conductividad térmica de la aragonita a diferentes temperaturas (Robertson, 1988).

la arena que mejor se ajustaba a esas características para así estimar el resto de sus propiedades.

Por otro lado, se realizó una caracterización (figura 13) del tamaño de las partículas de las muestras de arena para determinar sus diámetros mínimos, máximos y promedio. Esto con el fin de poder determinar el mecanismo de transferencia de calor que interviene en estas partículas. Se encontró que el diámetro promedio de los granos de arena es de 0.5mm con una desviación estándar de $\pm 0.3\text{mm}$.

Las propiedades seleccionadas para la simulación se encuentran en la tabla 1.

3.3 Selección de los HTF

Como se mencionó anteriormente, para los TESS comúnmente se utilizan aceites térmicos ya que estos cuentan con alta conductividad térmica, lo que facilita la transferencia de calor. Además, están diseñados para mantener sus propiedades en un amplio rango de temperaturas. Sin embargo los aceites térmicos tienen un costo elevado.

Dado que lo que se pretende en este trabajo es diseñar un sistema de bajo costo, se seleccionará aire como HTF y se hará una comparación con aceite térmico en las simulaciones. Las propiedades de ambos materiales se encuentran en la Tabla1.

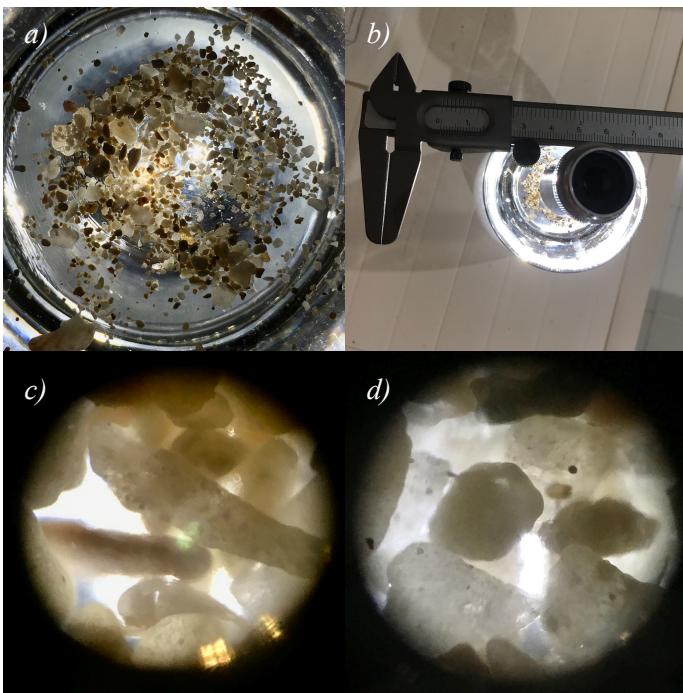


Figura 13. a) Muestra de arena de playa, b) instrumentación utilizada, c) composición general de la muestra, d) grano de arena promedio ($D=0.5\text{mm}$).

4. Diseño del sistema

En el presente trabajo, se propone un diseño de tanque de almacenamiento para aplicaciones de media temperatura, concretamente, para su implementación en un sistema de concentración PDC. El prototipo consiste en un recipiente cilíndrico con una capacidad de 1 m^3 y un arreglo de 19 tubos transversales en su interior, como se muestra en la figura 14, los cuales conforman el intercambiador de calor entre el TSM y el HTF. En las partes superior e inferior se considera una cámara de ingreso para el HTF, ya sea aire o aceite térmico. La cubierta exterior se modeló como una sola pieza para simplificar la simulación y se le designó una conductividad térmica equivalente de 0.048 W/mK . Para determinar las condiciones a las que opera el tanque de almacenamiento, se consideró un sistema de tipo PDC con una salida de potencia calorífica de 6.85 kW y un flujo másico del HTF de 0.023 kg/s y 0.009 kg/s . Las temperaturas de entrada de dichos fluidos se calcularon con la siguiente ecuación.

$$T_2 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} C_p} + T_1 \quad (1)$$

De este modo, las temperaturas de entrada al tanque de almacenamiento son las siguientes, aproximadamente:

- Aire: 314°C
- Aceite térmico: 292°C

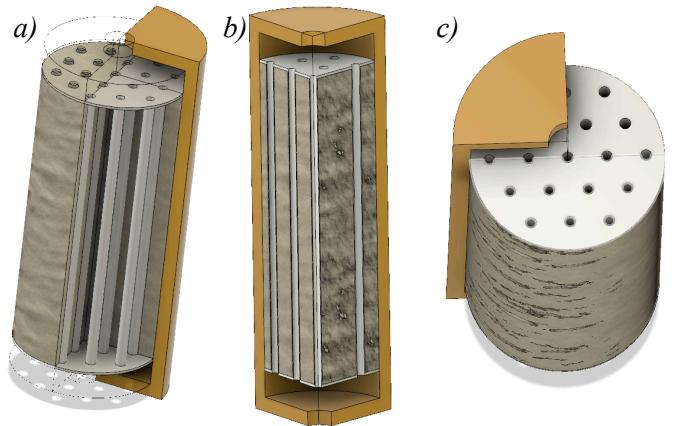


Figura 14. a) Vista seccionada de los componentes del tanque, b) vista del corte transversal del tanque, c) vista superior del tanque.

5. Fenómenos que intervienen

Una vez definido el sistema con el que se va a trabajar, se hace un análisis de los conceptos teóricos sobre la transferencia de calor en el interior del tanque de almacenamiento, con el fin de comprender mejor la manera en la que cada elemento del sistema interviene y cómo se desarrolla en el fenómeno de la transferencia de calor. Para el caso del HTF, el régimen del fluido tiene un gran impacto en dicho fenómeno, y así mismo, la estructura del TSM también lo afecta.

En primer lugar, las condiciones de frontera se deben determinar para poder hacer cualquier cálculo de transferencia de calor, ya que estas definen los límites de operación y la manera en la que se dará el intercambio de calor. En el interior del sistema, al tratarse de diferentes materiales que se encuentran en contacto uno con el otro, se puede determinar que la condición de frontera es de interfase. Dicha interfase se encuentra en la superficie de contacto entre las tuberías por donde circula el

Tabla 1
Propiedades de los materiales seleccionados

Material	Densidad (kg/m^3)	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)	Tamaño (mm)	Porosidad	Viscosidad cinemática (mm^2/s)
Piedra caliza [A]	2500	2.1	754	6.4	0.08	N/A
Arena de cuarzo [B]	1493.2	1.327	290	0.2 - 0.4	0.39	N/A
Arena de aragonita [B]	1501.7	1.13*	710	0.3 - 1	0.4	N/A
Aire [C]	0.6158*	0.0253	1,045.1	N/A	N/A	0.475*
Aceite térmico B [D]	681	0.114*	2902	N/A	N/A	1.2

* Valores a 300°C .

HTF y entre el TSM. Dado que existen pérdidas en el sistema, es de esperarse que la tubería se encuentre a una temperatura mayor que el TSM. Al utilizar un aislante, se da el caso especial de una frontera aislada, por la cual, la transferencia de calor se puede tomar como cero (Çengel Y., 2011). Sin embargo, al ser un sistema que considera las pérdidas, existirá una transferencia de calor por convección con el exterior lo cual permite determinar una nueva condición de frontera de flujo de calor.

Uno de los factores más importantes que influyen en la transferencia de calor entre el HTF y el TSM es el régimen del fluido dentro de las tuberías, ya que dependiendo de si es laminar o turbulento, se presentarán diferentes mecanismos de transferencia de calor. El régimen del fluido se calcula con la ecuación de Reynolds (2), para la cual, un valor por encima de 10,000, significa que existen perturbaciones en el flujo y esta condición se describe como *turbulento*.

$$Re = \frac{\bar{V}D}{\nu} \quad (2)$$

Donde \bar{V} es la velocidad promedio del fluido, D es el diámetro de la tubería y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

En el flujo turbulento, la capa límite se mezcla significativamente con el resto del fluido. Asimismo, el fluido turbulento no se ve afectado por el esfuerzo cortante que aplica la capa límite de la tubería, por lo que se toma una velocidad promedio dado que tampoco se desarrolla un perfil de velocidades (transferencia de momento) como en el caso laminar (figura 15). Para un intercambiador de calor, trabajar con fluidos turbulentos permite aumentar la eficiencia en el sistema ya que este régimen aumenta la velocidad a la que se da la transferencia de calor entre el HTF y los TSM (HRS Heat Exchangers, 2020).

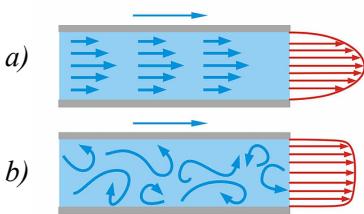


Figura 15. a) Perfil de velocidades del flujo laminar,
b) perfil de velocidades del flujo turbulento.

Al tratarse de flujo turbulento, la ecuación de Navier-Stokes permite modelar la transferencia de momento en el interior del fluido y también permite simular el recorrido del mismo a través de una tubería. Dada la complejidad de este cálculo, se emplean softwares de simulación CFD para su resolución. La ecuación (3) de Navier-Stokes se compone de 3 términos: un gradiente de presión ($-\nabla P$), el cual indica la dirección del fluido ya que este tiende a ir de una posición de mayor presión a una de menor presión, este representa la acción de una fuerza externa aplicada, como una bomba, por ejemplo; el segundo término ($\rho \vec{g}$) representa la acción de la gravedad sobre la masa del fluido y afecta su movimiento; el tercer término ($\mu \nabla^2 \vec{V}$) se interpreta como las pérdidas de momento debidas a la viscosidad del fluido, en función del laplaciano de la velocidad, es decir, de la variación de las velocidades a lo largo de la trayectoria del fluido (Connor, 2019). Estos términos están igualados

a un término de continuidad o conservación de la masa ($\rho \frac{d\vec{V}}{dt}$), en el cual se considera tanto un flujo estacionario como posibles variaciones de la velocidad en el tiempo (Maldonado, 2019).

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3)$$

Determinar el recorrido del fluido dentro del sistema de almacenamiento es importante ya que de esta manera se puede calcular la transferencia de calor de una manera más precisa.

Entre el HTF y el TSM se debe procurar emplear materiales con una alta conductividad térmica para favorecer la transferencia de calor entre ambos, pero se debe cuidar que estos sean compatibles entre ellos, es decir, no sufran daños significativos por corrosión u otro tipo de reacciones indeseadas.

Hablando ahora de la transferencia de calor en el TSM, existen algunos factores que afectan este fenómeno dependiendo no sólo de las propiedades del material sino también de su estructura. El número de Biot (Bi) es un número adimensional el cual explica la interacción entre la conducción en un sólido y la convección en su superficie. El valor numérico Bi es un criterio que da una indicación directa de la importancia relativa de la conducción y la convección para determinar el comportamiento de la temperatura de un cuerpo que se calienta o enfriá por convección en su superficie. Este fenómeno físico permite determinar si el cuerpo que se calienta lo hará de manera homogénea, mientras menor sea el numero de Biot, mayor será la homogeneidad del cuerpo, en cuyo caso, la diferencia entre las temperaturas superficial y la del interior será mínima, en comparación con la temperatura superficial y la temperatura del HTF (O. Louisnard, 2015). En este estudio el número de Biot es de gran importancia ya que en los sistemas de almacenamiento se busca la homogeneidad en la temperatura interna con el fin de mantener una eficiencia aceptable y maximizar el *factor de utilización*; en este caso específico, se busca que la diferencia de temperaturas entre el fluido y la tubería sea la mínima mientras que la diferencia de temperaturas por intercambio conductivo entre las paredes de la tubería y el material de almacenamiento también sea mínima.

6. Simulaciones y resultados

Para realizar las simulaciones del desempeño del TESS propuesto, se utilizó el programa COMSOL Multiphysics 5.3, el cual permite estudiar diferentes físicas simultáneamente sobre un mismo modelo tridimensional, en este caso. Sin embargo, debido a que las características de los equipos de cómputo utilizados no son las apropiadas, no fueron capaces de realizar una simulación de CFD. Por esta razón, se hizo una consideración muy importante y en lugar de simular al HTF como un fluido no isotérmico, se manejó al volumen que este ocupa como un sólido isotérmico, con el fin de comparar el tiempo en el que cada TSM alcanza una temperatura estable. Dado que este trabajo se centra principalmente en los TSM y no en los HTF, esta consideración definitivamente no representa un método apropiado de resolución aunque sí permite hacer la comparación del desempeño entre los materiales propuestos.

En una simulación apropiada, parámetros como la velocidad del fluido, flujo másico, la presión de salida, temperatura de entrada del fluido, densidad y la viscosidad son los principales que se deben de considerar.

Para las simulaciones realizadas, se tomó el modelo mostrado en la figura 14b, el cual representa 1/4 del tanque de almacenamiento y se seleccionó una propiedad de simetría en el software. Se seleccionaron los dominios del TSM, los HTF, así como los dominios del acero para los tubos del intercambiador, y el dominio de la cubierta aislante mencionada en el apartado 4. Como se mencionó anteriormente, se usaron arena de aragonita, grava de piedra caliza y arena de cuarzo como TSM, y aire y aceite térmico B como HTF.

Una vez definidos los dominios, se procedió a seleccionar las físicas que se ven involucradas en este estudio para posteriormente obtener una aproximación del comportamiento del sistema. Se seleccionó un intercambio de calor en sólidos dependiente del tiempo con el fin de observar su comportamiento tras 7 horas (25,200 seg). Dado que el dominio del HTF se modeló como un sólido, se le designaron las temperaturas calculadas en el apartado 4 al aire y al aceite térmico, la cuales fueron 587.15K y 565.15K, respectivamente. Asimismo, se habilitó la disipación de calor por convección con el aire en la superficie de la cubierta aislante.

Una vez realizadas las simulaciones, se obtuvieron las gráficas de temperatura y el contorno isotérmico del sistema, con el fin de poder realizar una comparación del comportamiento del sistema en el tiempo y con los otros materiales simulados.

6.1. Arena y aire

La primera combinación simulada fue arena como TSM y aire como HTF. En la figura 16 se muestran los perfiles desarrollados de temperatura y el isotérmico en el modelo. Como se puede observar, el dominio del aire es el que se encuentra a la mayor temperatura, y el dominio de la arena presenta una buena homogeneidad de temperaturas, lo cual indica una buena transferencia de calor, mismo que supondría una gran cantidad de energía térmica utilizable. Para calcular esta energía, se emplea la ecuación (4) una vez que se conoce la temperatura en estado estable de la arena, la cual resulta ser de 550K tras aproximadamente 6 horas de carga.

$$\Delta Q = \rho V C_p \Delta T \quad (4)$$

Los valores de ρ y C_p se tomaron de la tabla 1, y el volumen ocupado por el TSM es de 0.905 m³ una vez que se descuenta el espacio ocupado por los tubos. Para todas las simulaciones se consideró una temperatura inicial del TSM en 25°C. De esta manera, la capacidad de almacenamiento del sistema se espera que sea de 243.16 MJ, o su equivalente de 67.5 kWh.

Por otro lado, se observa que el exterior del sistema se mantiene a una temperatura constante de alrededor de 300K, esto se debe a la convección que se da con el aire del medio ambiente y a la baja conductividad térmica del material aislante.

Como se mencionó en apartados anteriores, el cuarzo en los materiales aumenta de manera significativa la transferencia de calor. Para realizar la comparación del comportamiento entre la arena de playa (aragonita) y la de cuarzo, se realizó una simula-

ción con esta última para observar el comportamiento del sistema. Se obtuvo que para un periodo de carga de 5.5 horas, se alcanza una temperatura de 571K y una buena homogeneidad del material (figura 17), lo cual implica un aumento en la capacidad de almacenamiento de 4.75 kWh, llegando a un total de 72.25 kWh.

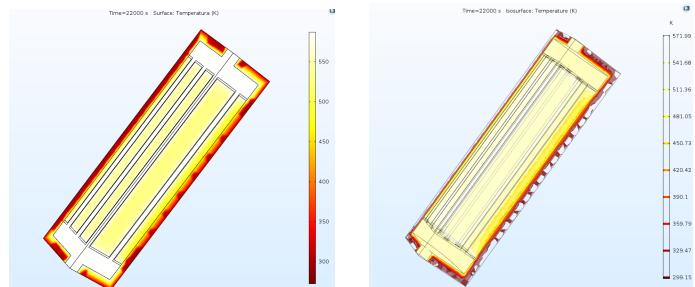


Figura 16. a) Temperatura del tanque después de 6 horas, b) Contorno isotérmico del tanque después de 6 horas.

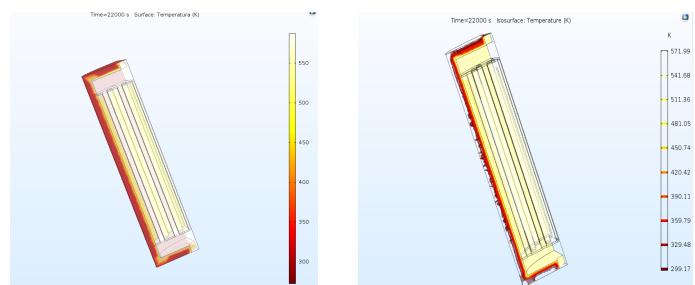


Figura 17. a) Temperatura del sistema con arena de cuarzo después de 6 horas, b) Contorno isotérmico del tanque con arena de cuarzo después de 6 horas.

6.2. Grava y aire

Al igual que con la arena, se seleccionó la grava como TSM y se siguió el mismo proceso realizado para las simulaciones anteriores pero cambiando el material de almacenamiento por grava. En la figura 18, se puede observar cómo se da una transferencia de calor similar a la obtenida con la arena de cuarzo pero a una mayor velocidad. La grava alcanzó una temperatura de 571K en un tiempo aproximado de 5 horas, esto se debe a que este material posee un valor de k significativamente más alto que el de las arenas. Con esto, la capacidad que logra alcanzar el sistema es de 138.84 kWh. Aunque este valor es alto, hay que tomar en cuenta que la gran desventaja de los materiales rocosos es su tiempo de vida; sin embargo, al no manejarse temperaturas tan altas, este material podría representar una

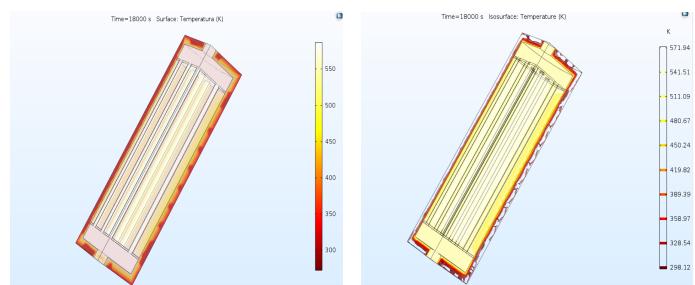


Figura 18. a) Temperatura del sistema con grava después de 5 horas, b) Contorno isotérmico del tanque con grava después de 5 horas.

buenas alternativas. Al igual que en los casos anteriores, se puede observar que el almacenamiento es bastante uniforme en el material lo que supondría una gran cantidad de energía utilizable.

6.3. Arena y aceite térmico

Al realizar la simulación con arena y aceite térmico, se obtuvo que la transferencia de calor es bastante rápida, con lo que tras 3 horas bajo condiciones estables, se alcanza una temperatura de 550K, que aunque parezca baja, cabe señalar que el HTF se encuentra a una temperatura de 565.15K, lo cual implica una buena transferencia de calor.

La energía almacenada por el sistema es igual que en el caso de la arena con aire debido a que se alcanza la misma temperatura y se trata del mismo TSM, pero el tiempo en el que se alcanza esta temperatura se reduce a la mitad, es decir, el aceite térmico beneficia significativamente a la transferencia de calor. El sistema podrá suministrar energía en menores lapsos de tiempo ya que este se carga rápidamente; esto supondría un beneficio para la implementación a gran escala.

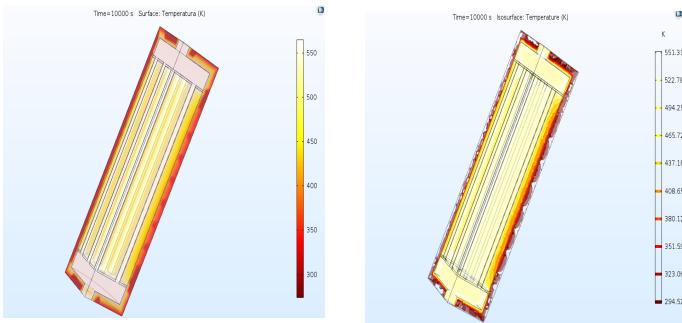


Figura 19. a) Temperatura del sistema con arena y aceite térmico después de 3 horas, b) Contorno isotérmico del tanque con arena y aceite térmico después de 3 horas.

6.4 Grava y aceite térmico

Al igual que en el caso anterior, se observa que la velocidad de la transferencia de calor entre el aceite térmico y la grava aumenta de manera considerable resultando en un tiempo de carga de tan sólo 1 hora y alcanzando una temperatura de 550K. Este resultado se obtiene ya que se combinan los dos materiales con las mayores conductividades térmicas.

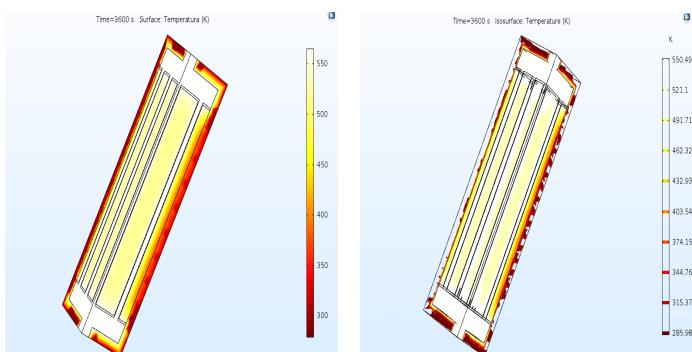


Figura 20. a) Temperatura del sistema con grava y aceite térmico después de 1 hora, b) Contorno isotérmico del tanque con grava y aceite térmico después de 1 hora.

Por otro lado, la capacidad del sistema se reduce hasta los 119.41 kWh. No conserva el mismo valor del caso de grava y aire debido a que la temperatura del HTF es menor. Si se encontrara a la misma temperatura, podría esperarse un tiempo de carga ligeramente mayor pero seguiría siendo el menor de entre los casos analizados.

Tabla 2

Resultados de las simulaciones

Simulación	Temperatura [K]	Tiempo de carga [h]	Energía almacenada [kWh]
Arena y aire	550	6	67.5
Arena de cuarzo y aire	571	5.5	72.25
Grava y aire	571	5	138.84
Arena y aceite	550	3	67.5
Grava y aceite	550	1	119.41

7. Conclusiones

En la actualidad, el almacenamiento térmico de energía ha ganado gran relevancia debido a la tendencia por abandonar los combustibles fósiles; sin embargo, el alto costo de los materiales desarrollados para este tipo de sistemas no permite su implementación diversificada. Es por esto que se buscan alternativas de bajo costo y gran abundancia local para sustituir los TSM normalmente utilizados a escala industrial, tal es el caso de las sales fundidas.

Las principales alternativas que se han estudiado son las rocas, el concreto y las arenas, cada uno de los cuales presenta sus ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. El concreto es una buena alternativa para aplicaciones de baja temperatura ya que de esta manera no se arriesga tanto a generar fracturas; sin embargo, al no ser un material disponible naturalmente sino que requiere de un proceso de fabricación, se le asocian emisiones de CO₂, lo cual no cumple con los criterios deseables para un TSM; aunque, si se implementa como solución de almacenamiento en situaciones donde se requiere el uso del concreto, por ejemplo, en las construcciones, entonces este material sería una opción muy apropiada.

Las rocas o grava presentaron los mejores resultados de la evaluación del TESS propuesto dado que son materiales muy densos y cuentan con una buena conductividad térmica. Cuando se dispone en abundancia de rocas que cumplen con estas características, son una de las mejores alternativas como TSM ya que con estas se logra una buena capacidad de almacenamiento en un espacio reducido dada su alta densidad. Asimismo, su alta conductividad térmica permite recibir y suministrar calor en un tiempo reducido. Sólo se debe cuidar el tipo de aplicación que se le dará, ya que si se manejan temperaturas muy altas, se comienzan a presentar daños que reducen la vida útil del material.

La arena de playa, a pesar de ser un material abundante en sitios cercanos a la costa, no puede considerarse como una alternativa ideal para TSM, ya que no presenta una buena conductividad térmica, lo cual afecta en los tiempos de carga y

descarga. Aunque, cuando se trata de arenas con un alto contenido de cuarzo, los resultados indican que tienen un desempeño aceptable, por lo que si se cuenta con un gran recurso, es posible utilizarlas en un TESS.

En general, se puede decir que la conductividad térmica es un factor determinante en los tiempos de carga y descarga del TSM, y es preferible emplear materiales que también sean de diámetros pequeños, para mejorar la transferencia de calor en los ciclos de carga y descarga. El calor específico es un factor determinante en la capacidad de almacenamiento ya que para un mismo rango de temperaturas se logra acumular una mayor energía cuando el C_p es alto. Visto de otra manera, este factor permite reducir el volumen del sistema para una misma capacidad energética.

Por otra parte, los resultados obtenidos de las simulaciones mostraron una buena distribución de la temperatura en el interior de los TSM analizados. Aunque la física evaluada fue bastante sencilla, esto se le puede atribuir principalmente a una buena distribución de los tubos dentro del tanque.

Finalmente, es necesario realizar una simulación apropiada de transferencia de calor y flujo turbulento para así poder obtener indicadores más importantes como el factor de utilización, los tiempos de carga y descarga, la temperatura de salida del HTF y la capacidad almacenada en función de la transferencia de calor con un flujo turbulento. Y de esta manera, poder validar las conclusiones establecidas respecto a los materiales simulados.

8. Referencias

- J. Knaack, M. Oropeza, K. Potowski, A. Quiñones. (2018). *Calor Solar para la Industria México*. Solar Payback, recuperado de https://www.solar-payback.com/wp-content/uploads/2018/08/Solar-Payback_Calor-Solar-para-la-Industria_Mexico.pdf
- SENER. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. Gobierno de México - Secretaría de Energía.
- J. Nordbeck, C. Beyer, S. Bauer. (2020). *Experimental and numerical analysis of a cement based thermal energy storage system with a helical heat exchanger*. Applied Thermal Engineering, 1359-4311.
- G. Shen, X. Wang, A. Chan. (2019). *Experimental investigation of heat transfer characteristics in a vertical multi-tube latent heat thermal energy storage system*. Energy Procedia, 332-339.
- G. Sodhi, K. Vignesharan, A. Jaiswal, P. Muthukumar. (2018). *Assessment of heat transfer characteristic of latent heat thermal energy storage system: Multi tube design*. Energy Procedia, 4677-4683.
- H. Chen, J. Wang, Z. Rahman, J. Worden, X. Liu, Q. Dai, Q. Huo. (2007). *Beach sand from Cancun Mexico: a natural macro- and mesoporous material*. Springer, 6018–6026.
- Agnes W., K. Löwe, F. Saleron. (2018). *Design and simulation of a concentrated solar thermal system with an integrated concrete storage for continuous heat supply*. Energy Procedia, 155, 121–130.
- M. Elashmawy. (2020). *Improving the performance of a parabolic concentrator solar tracking-tubular solar still (PCST-TSS) using gravel as a sensible heat storage material*. Destination, 473, 114182.
- [A] Tiskatine R., Oaddi R., Ait El Cadi, R. Bazgaou, A. Bouirden, L. Aharoune, A. & Ihlal, A. (2017). *Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 169, 245–257.
- [B] Xu B., Han J., Kumar A., Li P., Yang Y. (2017). *Thermal storage using sand saturated by thermal-conductive fluid and comparison with the use of concrete*. Journal of Energy Storage, 13, 85–95.
- S. Kiwan, Q. Soud. (2018). *Numerical investigation of sand-basalt heat storage system for beam-down solar concentrators*. Case Studies in Thermal Engineering 100372.
- N. Mahfoudi, A. Moummi, M. Ganaoui. (2014). *Sand as a Heat Storage Media for a Solar Application: Simulation Results*. Applied Mechanics and Materials, 214-220.
- S. Ghoreishi, A. Safarib, L. Amiric, D. Baidyaa, A. Rodrigues, A. Fahrettin, (2018). *Investigation of the viability of seasonal waste heat storage in rock piles for remote communities in cold climates*. Energy Procedia, 159, 66-71.
- D. Schlipf, P. Schicktanz, H. Maier, G. Schneider. (2015). *Using sand and other small grained materials as heat storage medium in a packed bed HTTESS*. Energy Procedia, 1029-1038.
- S. Warerkar, S. Schmitz, J. Goettsche, B. Hoffschmidt, M. Reiβel. (2009). *Air-sand heat exchanger for high-temperature storage*. ASME. ES2009-90274.
- K. Bataineh, A. Gharaibeh. (2018). *Optimal design for sensible thermal energy storage tank using natural solid materials for a parabolic trough power plant*. Solar Energy, 171, 519-525.
- Castro, J. (2013). *What is sand?*. LiveScience, recuperado de <https://www.livescience.com/34748-what-is-sand-beach-sand.html>
- E. Robertson. (1988). *Thermal Properties of Rocks*. United States Department of the Interior Geological Survey. 99 págs.
- HRS Heat Exchangers. (2020, February 20). *Comparación entre flujo laminar y turbulento*. <https://www.hrs-heatexchangers.com/mx/recursos/comparacion-entre-flujo-laminar-y-turbulento/#:%7E:text=Para%20n%C3%A9ros%20de%20Reynolds%20por,para%20un%20intercambiador%20de%20calor>.
- Simscale. (2021, January 20). *What Are the Navier-Stokes Equations? | SimScale Numerics*. <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-are-the-navier-stokes-equations/>
- [C] Çengel Y., Boles M. (2009). *Termodinámica*. Apéndice 1. Sexta edición. McGraw Hill. pág. 929.
- [D] Shell. (2009). *Shell Thermia Oil B High Performance Heat transfer fluid*, recuperado de <https://www.smithandallan.com/documents/Thermia%20B%20TDS.pdf>
- Maldonado S. (2019). *Simple Derivation of the Navier-Stokes Equations*. YouTube, recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=vszxLH-fUuI>
- Connor, N. (2019). *What is Navier-Stokes Equation – Definition*. Thermal Engineering, recuperado de <https://www.thermal-engineering.org/what-is-navier-stokes-equation-definition/>