

Proyecto Fin de Carrera

Análisis de sistemas Heat Pipe para células
AMTEC y su aplicación en centrales termosolares

Autor

Andrés Romea Torralba

Director

Carlos Monné Bailo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Junio de 2013

RESUMEN

El impulso y desarrollo que está experimentando la energía termosolar hoy en día a nivel mundial, crea la necesidad de estudio y mejora de los sistemas de generación de potencia y transmisión de energía. Con objeto de responder a esta necesidad surge este proyecto.

De los diversos dispositivos de producción energética termosolar, ha surgido un especial interés por las células AMTEC asociadas a un disco parabólico, aún en fase de investigación. Conocer que posibilidades ofrece este sistema a través del estudio de sus características y, más concretamente desarrollar un dispositivo de transferencia de calor entre células AMTEC y disco parabólico son los objetivos del proyecto.

El sistema disco parabólico-células AMTEC requiere de un intercambiador de calor que tenga la capacidad de absorber la energía solar concentrada por el disco parabólico y transmitirla de forma continua a las células. Este intercambiador puede tener diversas configuraciones, de las cuales, seleccionamos un heat pipe, debido a su gran capacidad de transporte energético. Para ello se ha modelado un diseño, que permite adecuarse a las condiciones de trabajo que exigen las células AMTEC. Posteriormente se ha analizado, observando que parámetros afectan a su funcionamiento y así poder definir el rango de operación.

En resumen, lo que se pretende es diseñar y analizar un Heat pipe que tenga como aplicación la transmisión de calor entre células AMTEC y disco parabólico.

El proyecto se ha desglosado en dos partes:

1. Estudio de las células AMTEC por ser una alternativa novedosa en el sector termosolar que ofrece elevadas eficiencias de conversión. Incluyendo en este apartado el funcionamiento, componentes y problemáticas de las células AMTEC.
2. Diseño y análisis matemático del heat pipe que permita la alimentación de células AMTEC. Para ello se observa cómo afecta la variación de los parámetros dimensionales del heat pipe (longitud, estructura porosa interna, inclinación, sección transversa) y características del fluido de trabajo a la capacidad de transferencia de calor y las limitaciones asociadas a su funcionamiento.

Índice

RESUMEN.....	0
1. AMTEC	1
1.1. PARTES INTEGRANTES DEL AMTEC.....	3
1.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	4
1.3. POTENCIA DESARROLLADA POR CÉLULAS AMTEC	6
1.4. COSTE DE PRODUCCIÓN	6
2. HEAT PIPE	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. BOMBEO POR CAPILARIDAD	8
2.3. LIMITACIONES: RELLENO POROSO, SÓNICA, VISCOSIDAD, ARRASTRE Y EBULLICIÓN	10
2.4. CÁLCULO DEL LÍMITE DE OPERACIÓN.....	13
2.4.1. Supuestos	13
2.4.2. Fluido de trabajo	14
2.4.3. Parámetros de diseño	15
2.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL HEAT PIPE	17
2.5.1. Sumario	21
3. CONCLUSIONES.....	22
4. LINEAS FUTURAS	23

MEMORIA

1. AMTEC

El AMTEC, cuyas siglas en inglés significan Alkali Metal Thermal to Electric Converter, es un dispositivo que permite a través de la energía térmica producir electricidad mediante la reacción electrolítica de un metal alcalino.

El ciclo de trabajo sigue un proceso térmico regenerativo, es decir el calor no es retirado del sistema al final del mismo, como sucede en un motor de combustión interna, donde el calor es expulsado juntos a los gases de escape. El calor del fluido de trabajo es reutilizado en el siguiente ciclo (el fluido es recirculado siguiendo un circuito cerrado) aumentando la eficiencia.

El fluido de trabajo es un metal alcalino (litio, sodio o potasio), sufriendo éste una reacción electroquímica de ionización de los átomos en la interface electrodo-electrolito. Los electrones liberados son conducidos a una carga externa, realizando trabajo y posteriormente recombinados con los iones para formar átomos neutros al otro lado del electrodo.

Dicho convertidor termoeléctrico presenta ciertas ventajas sobre otras formas de generación de electricidad **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

1. Elevada eficiencia, cercana a la del ciclo de Carnot, entre el 20 y 40%.
2. Alta densidad de potencia (en diseños optimizados está en torno a los 0.5 KW/Kg).
3. Ausencia de partes móviles, evitando de esta manera problemas de lubricación, desgaste por fricción y ruido. En resumen, requiere un menor mantenimiento y tiene una alta fiabilidad.
4. Disponibilidad de los materiales con los que es fabricado y un bajo costo de producción.
5. Diseño modular, que permite con la conexión de varias celdas la generación de gran cantidad de electricidad a bajos voltajes. A su vez, la avería de una de las células no afecta al conjunto.

Fue desarrollado e investigado por los Dres. J. Kummer y N. Weber en la década de los sesenta, siendo patentado como el Motor Térmico de Sodio. A partir de los años noventa se ha generado un interés por el AMTEC en el campo de las energías renovables, concretamente en la solar, siendo el nexo de unión entre ambas el disco parabólico. También se ha estudiado su aplicación en la industria aeroespacial, vehículos híbridos, generadores de energía portátiles, generación de potencia a nivel residencial con independencia o no de la red eléctrica, aire acondicionado e iluminación, baterías recargables, hornos domésticos auto-suficientes, usos militares y micro cogeneración **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Este proyecto se centra en el uso del AMTEC en el ámbito de la energía solar.

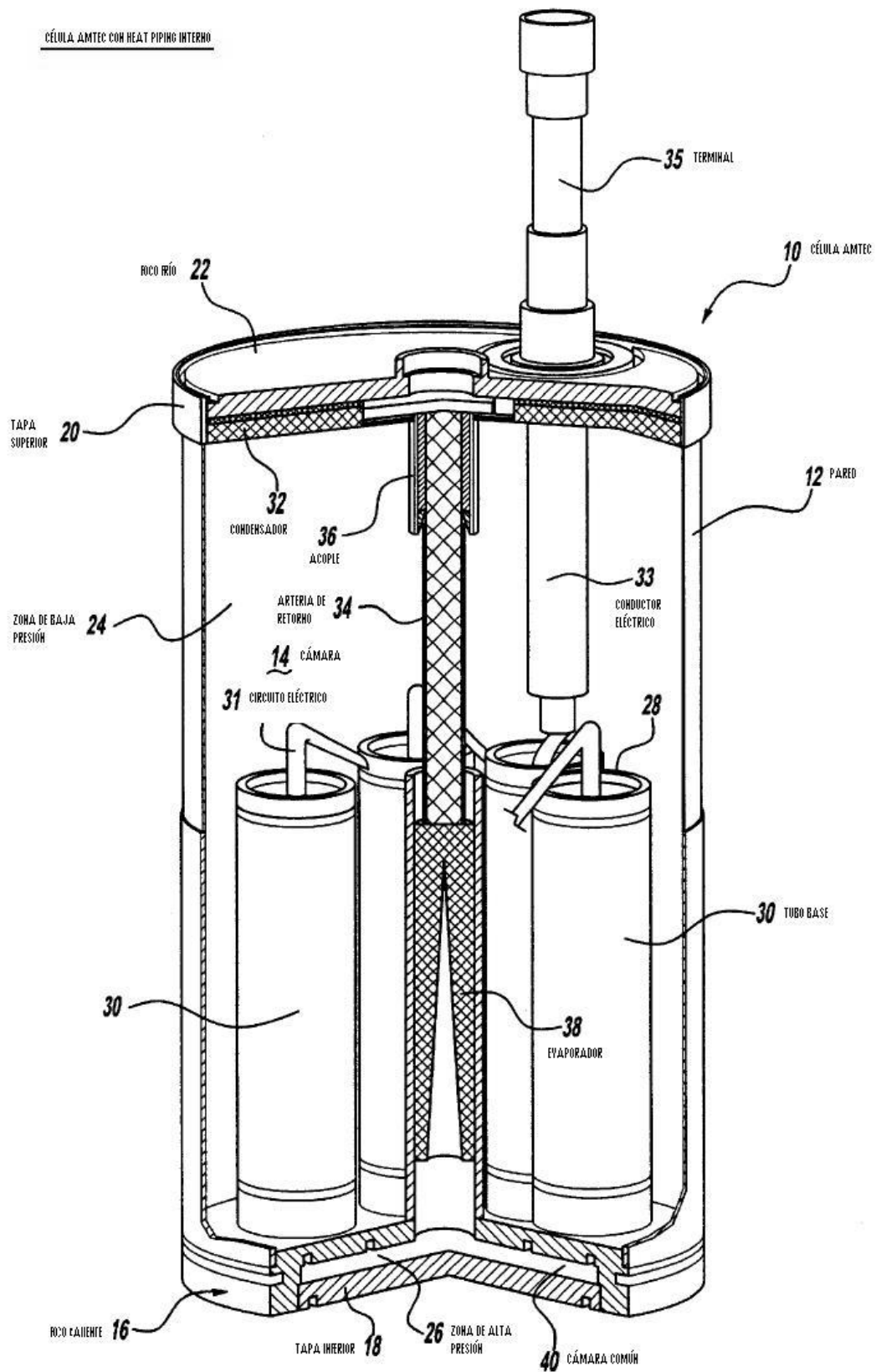


Figura 1 Célula AMTEC con el sodio en estado líquido en la zona del ánodo ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

1.1. PARTES INTEGRANTES DEL AMTEC

Componentes: 1.Tubos BASE, 2.Receptor de calor, 3.Pared celda, 4.Evaporador, 5.Condensador, 6.Arteria, 7.Anillos térmicos, 8.Circuito eléctrico, 9.Cátodo, 10.Ánodo, 11.Escudo térmico.

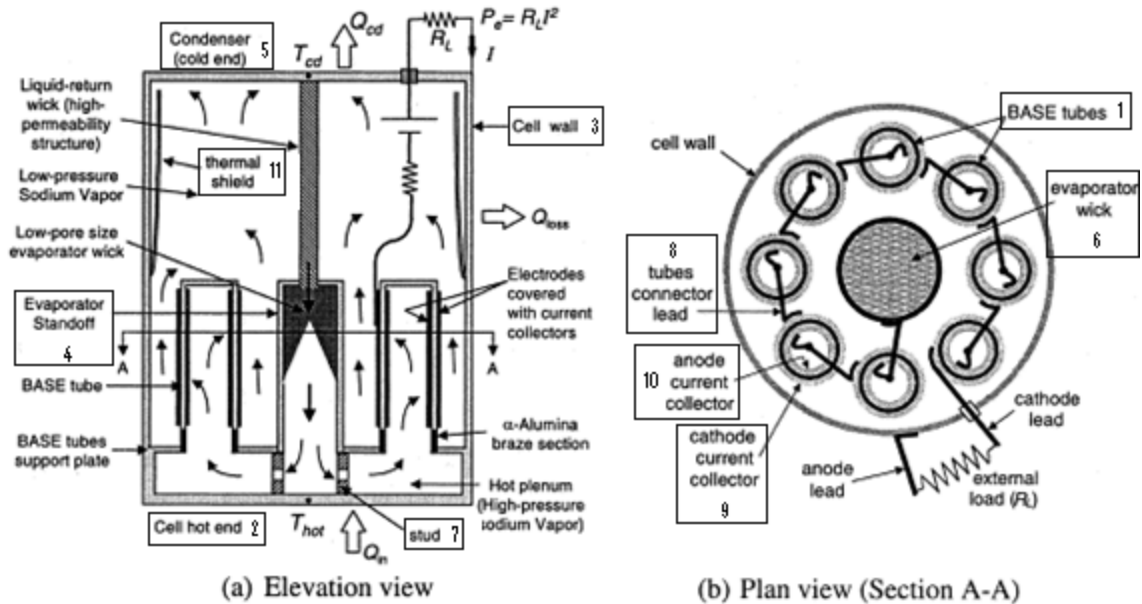


Figura 2 PX-3ª AMTEC a) vista del alzado b) vista del corte en planta. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

El AMTEC emplea un electrolito sólido de forma tubular fabricado a partir de un material cerámico llamado β'' -alúmina. El electrolito sólido β'' -alúmina (BASE, Beta Alumina Solid Electrolyte) se trata de un conductor iónico que a su vez actúa como aislante eléctrico (1) Figura 2. El calor de la fuente es transferido a la célula a través de un plato o disco soporte (2) Figura 2, situándose el rango de temperaturas de trabajo en este punto entre 1000 K – 1300 K.

Las paredes de la celda de acero inoxidable, Figura 2 (3), previenen las pérdidas de calor gracias a la reflexión que proporcionan. La celda consta de un evaporador Figura 2 (4) y un condensador Figura 2 (5) unidos mediante una arteria Figura 2 (6) (wick) que direcciona el fluido circulante. Los anillos térmicos Figura 2 (7) (studs), hechos de níquel, se emplean en mejorar la conducción de calor entre el evaporador y el disco soporte.

Los tubos BASE se encuentran conectados eléctricamente en serie, y al igual que el evaporador están conectados al plato soporte Figura 2 (8).

Los electrodos son fabricados a partir de molibdenos (Mo), nitruros de titanio (TiN) y aleaciones rodio-tungsteno (RhW y Rh₂W). El cátodo Figura 2 (9), es aplicado sobre el BASE por deposición química de vapor o sputtering, mientras que el ánodo Figura 2 (10), es aplicado sobre el BASE por el proceso Weber, además se le recubre con molibdeno para evitar pérdidas eléctricas en su interior. Su función es guiar la corriente eléctrica a la carga.

Los escudos térmicos cumplen la función de reducir las pérdidas de calor parásitas por radiación, Figura 2 (11).

1.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En la Figura 4, se muestra el sistema de generación de potencia compuesto por los dos circuitos cerrados de sodio, el disco parabólico, receptor, condensador, evaporador (intercambiador o heat pipe) las células AMTEC y la bomba electromagnética/circuito capilar.

1º. Circuito cerrado de sodio primario

El disco parabólico refleja y concentra los rayos solares en un receptor localizado en el foco del disco. Dentro del receptor, se encuentra la cavidad, donde el sodio es vaporizado por el intenso calor. El vapor de sodio generado fluye hacia el intercambiador, donde cede el calor latente de vaporización al fluido de trabajo del AMTEC. El sodio líquido resultante en el intercambiador tras la cesión de calor es recirculado al evaporador (cavidad) mediante una bomba electromagnética o por gravedad.

La solución que se plantea posteriormente es la sustitución del circuito de la Figura 4, por un Heat pipe (intercambiador de calor cerrado que trabaja en cambio de fase).

2º. Circuito cerrado de sodio secundario

Por otra parte, el sodio líquido que circula a través del AMTEC absorbe el calor liberado, alcanzando elevada presión y temperatura en estado vapor (1200 K, >20 kPa), siendo posteriormente introducido en la célula AMTEC.

Una vez allí, el sodio entra en contacto con el ánodo, donde se oxida, debido a la diferencia de potencial electroquímico entre ambos. Quedando los electrones retenidos en el ánodo, Figura 3.

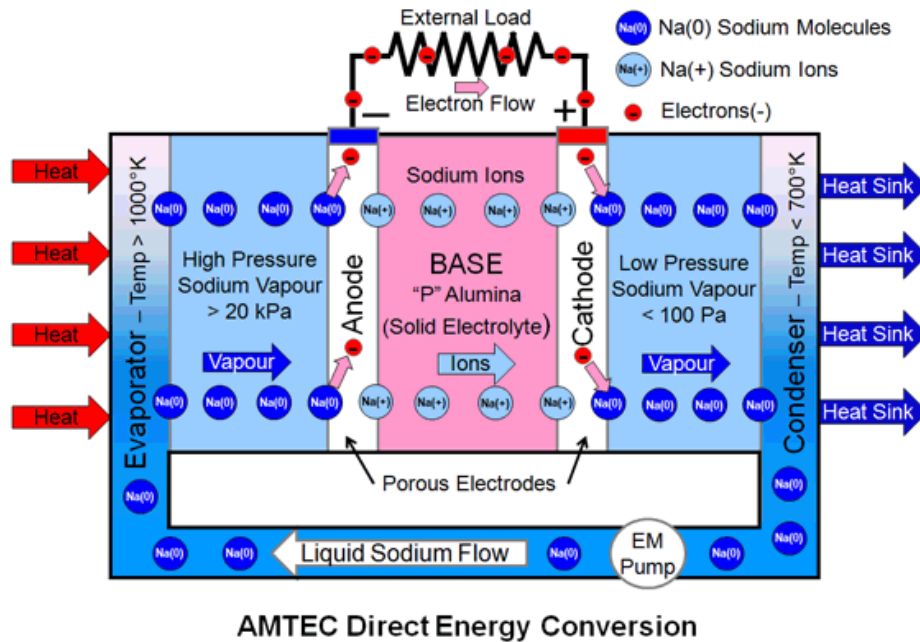


Figura 3 Electrólisis del sodio ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

La diferencia de presión existente entre ambos lados de los tubos BASE y la energía térmica aportada, conduce los iones desde el lado de alta presión al lado de baja, de este modo los iones positivos comienzan a acumularse en el lado de baja presión, mientras los electrones están retenidos en el lado de alta presión, resultando una diferencia de potencial entre los dos lados del BASE. Con la conexión del ánodo-cátodo a través de una carga externa y gracias a la diferencia de potencial, los electrones comienzan a fluir a través de la carga, generando así corriente eléctrica. Los electrones circulan desde el ánodo hacia el cátodo, donde se recombinan con los iones que han pasado por el BASE, formando de nuevo átomos neutros de sodio.

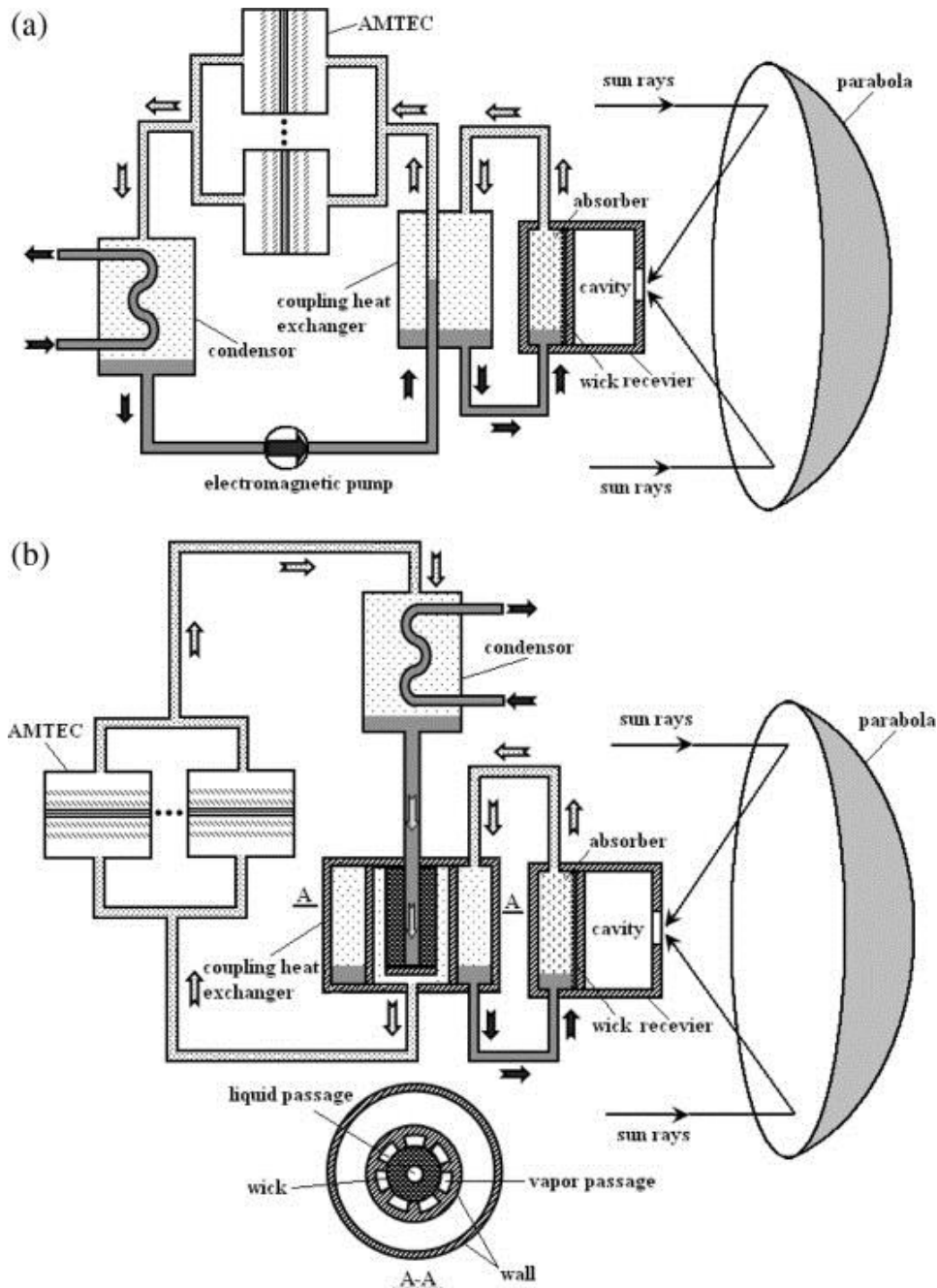


Figura 4 Disco parabólico/AMTEC a) con bomba electromagnética b) circuito capilar ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

1.3. POTENCIA DESARROLLADA POR CÉLULAS AMTEC

Estudios previos sobre el funcionamiento de las células AMTEC-disco parabólico, han desarrollado diseños que generan 10 kW de potencia eléctrica con eficiencias en torno al 20% ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

En este caso, la eficiencia individual de las células AMTEC es del 25-30% y la potencia asociada a cada célula es de unos 500 W. El sistema se compone de 20 células producen un total de 10 kW eléctricos. Cada célula consta de 19 tubos BASE conectados eléctricamente en serie Figura 5.

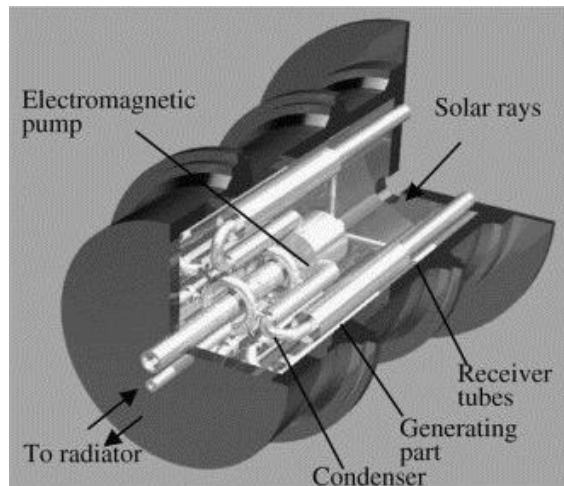


Figura 5 Diagrama esquemático de un sistema de recepción térmico de 10 kW **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

1.4.COSTE DE PRODUCCIÓN

Desde el punto de vista económico las características de las células AMTEC se traducen en un ahorro significativo en la generación de electricidad. Considerando la naturaleza pasiva del sistema disco/AMTEC, tiene potencial para convertirse en una de las alternativas de generación eléctrica más económicas del mercado de las energías renovables. Su competidor más cercano en este ámbito es el disco/Stirling. Un disco/Stirling de 25 kW posee una eficiencia de en torno al 30% (31.25%, en 2007), los costes asociados son de unos 3300 \$/kW, mientras que los costes de producción estimados para el disco/AMTEC varían desde los 1000 \$/kW a los 2000 \$/kW, o lo que es lo mismo, la implantación de células AMTEC supone un ahorro de 2300-1300 \$/kW **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

2. HEAT PIPE

2.1. INTRODUCCIÓN

Un heat pipe o tubo de calor, es un intercambiador de calor cerrado en el cual, el fluido transfiere calor de un extremo a otro del tubo en cambio de fase.

Ambos extremos del tubo funcionan como evaporador-condensador, siendo el fluido recirculado por capilaridad, gracias a la estructura porosa dispuesta en las paredes, Figura 6.

El líquido se evapora en el extremo caliente y se condensa en el frío. A medida que el vapor sale de la sección de evaporación, se forman huecos en la superficie debido a que el líquido se adhiere a la estructura porosa. Entre tanto en la sección de condensación, el relleno poroso se inunda. La tensión superficial que actúa en la interfaz cóncava líquido-vapor en la sección de evaporación hace que la presión de vapor sea superior a la del líquido. El vapor transmite esta presión a la sección condensadora inundada, donde las presiones del líquido y del vapor son casi iguales, y así el líquido es impulsado del condensador al evaporador a través del relleno poroso.

Los fluidos de trabajo que se usan en los tubos de calor tienen una entalpía de evaporación elevada. Por lo tanto, un pequeño flujo de vapor a través del tubo puede transportar una gran cantidad de energía térmica. La diferencia de temperatura total necesaria es la suma de las diferencias que se requieren para conducir el calor a través de la pared y el relleno poroso del evaporador y condensador.

Otras propiedades convenientes del fluido son una gran tensión superficial en el interior del relleno poroso y una baja viscosidad, a fin de mejorar el bombeo por capilaridad, así como una alta conductividad térmica en estado líquido para reducir las caídas de temperatura en el evaporador y condensador.

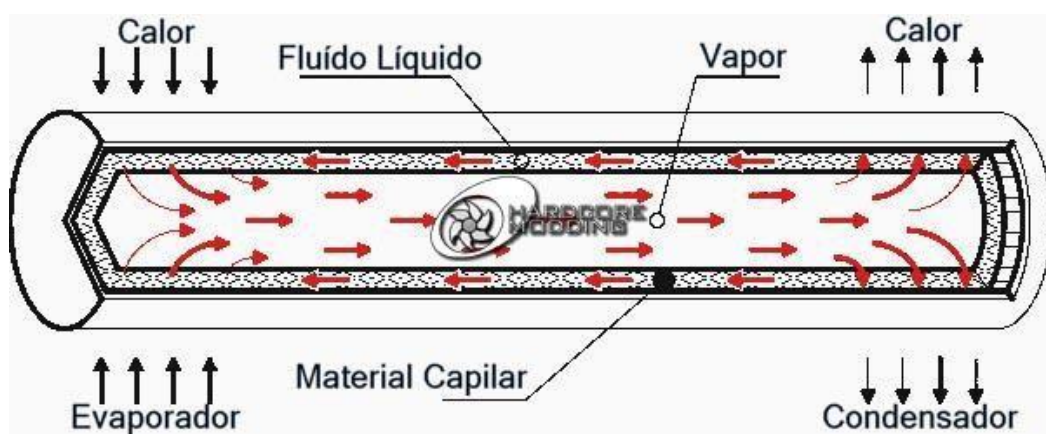


Figura 6 Funcionamiento Heat pipe ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

El relleno poroso debe tener poros superficiales para generar presión de bombeo por capilaridad, canales internos de flujo a fin de que el líquido pueda regresar al evaporador y una trayectoria adecuada para el flujo de calor desde la pared interior del tubo a la interfaz líquido-vapor.

Los rellenos porosos pueden ser de tamiz de alambre, metal sinterizado, espuma metálica, fieltro metálico, malla de alambre tejido o surcos axiales.

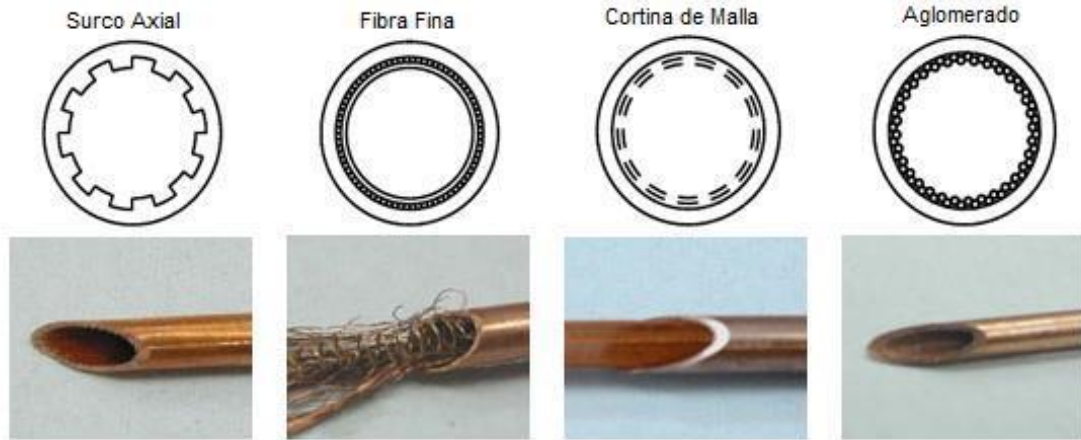


Figura 7 Ejemplos de estructura capilar [Error! No se encuentra el origen de la referencia..]

Una malla fina genera una elevada presión de bombeo por capilaridad, en tanto que los surcos reducen la resistencia al flujo del líquido y la resistencia al flujo de calor a través del relleno poroso.

2.2. BOMBEO POR CAPILARIDAD

El bombeo por capilaridad rige el transporte de fluido a lo largo del heat pipe. La cuantificación de las fuerzas que experimenta el fluido se realiza a través de un balance de presión, cuya configuración interior es un relleno poroso distribuido anularmente.

$$\Delta P_C - \Delta P_G = \Delta P_l + \Delta P_v$$

ΔP_C altura capilar, ΔP_G altura gravitacional, ΔP_l caída de presión de la fase líquida, ΔP_v caída de presión de la fase de vapor.

Se hace el balance para una longitud efectiva L_{ef} del tubo de calor, que va desde el punto medio del evaporador hasta el del condensador.

ΔP_G es nula en caso de un tubo horizontal y negativo si el condensador está ubicado por encima del evaporador.

En general, las caídas de presión ΔP_l y ΔP_v aumentan con la carga térmica debido al incremento de la tasa de flujo, por lo tanto la altura capilar necesaria ΔP_C también aumenta. Sin embargo, existe una presión capilar máxima $(\Delta P_C)_{m\acute{a}x}$ posible para cada combinación de líquido y material del relleno poroso. Para que un tubo de calor pueda funcionar de manera continua debe cumplirse:

$$\Delta P_C < (\Delta P_C)_{m\acute{a}x}$$

De lo contrario el relleno poroso puede secarse, circunstancia que se conoce como quemado destructivo del evaporador. Cuando esto ocurre debe disminuirse la carga

térmica del evaporador. A continuación se describen los términos mencionados anteriormente.

Altura capilar

Es la altura que proporciona la estructura capilar.

$$\Delta P_C = 2\sigma \left(\frac{\cos\theta_e}{r_p} - \frac{\cos\theta_c}{r_p} \right)$$

$(\Delta P_C)_{max}$ cuando $\cos\theta_e = 1$ y $\cos\theta_c = 0$. Siendo θ el ángulo de contacto, que indica condiciones de mojado y secado ideales en condensador y evaporador.

$$(\Delta P_C)_{max} = \frac{2\sigma}{r_p}$$

Altura gravitacional

La altura gravitacional es la diferencia de presión hidrostática entre el evaporador y el condensador. Puede ser positiva negativa o nula según sea la elevación relativa de éstos.

Aplicando $\rho_v \ll \rho_l$.

$$\Delta P_G = \rho_l g L_{ef} \sin\phi$$

Caída de presión de la fase líquida

La caída de presión en un líquido que influye a través de un relleno poroso homogéneo puede calcularse a partir de la ley de Darcy para el flujo a través de medios porosos:

$$\Delta P_l = \frac{\mu_l L_{ef} \dot{m}}{\kappa \rho_l A_w}$$

Caída de presión de la fase vapor

La caída de presión de la fase vapor puede calcularse a través de la suma de las caídas de presión en tres regiones: evaporador, zona adiabática y condensador. Sin embargo es complejo determinar estas pérdidas en el evaporador y el condensador, debido a flujo radial producido por la evaporación o la condensación.

Es en general mucho menor que la de la fase líquida. Por ello es posible despreciarla o hacer un cálculo muy aproximado.

$$\Delta P_v = \frac{64}{Re_{D_{hv}}} \frac{L_{ef}}{D_{hv}} \left(\frac{1}{2} \rho_v V_v^2 \right) \quad D_{hv} = 4 \frac{\text{Área de flujo vapor}}{\text{Perímetro húmedo}}$$

2.3. LIMITACIONES: RELLENO POROSO, SÓNICA, VISCOSIDAD, ARRASTRE Y EBULLICIÓN

El análisis de estas limitaciones de forma independiente permite conocer la capacidad de transmisión de calor que ofrece el heat pipe, quedando su rango de aplicación determinado por el área encerrada bajo las curvas que representan cada una de las limitaciones, Figura 8.

La forma de esta área depende del fluido de trabajo y material de la mecha, variando apreciablemente para diferentes heat pipes.

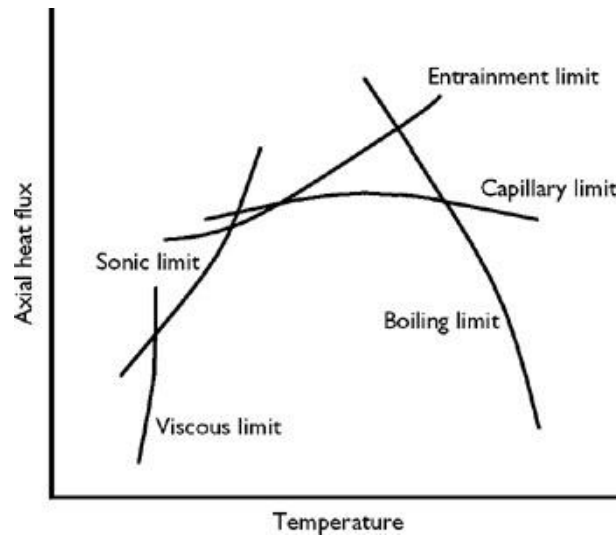


Figura 8 Esquema de los límites de funcionamiento de un heat pipe [Error! No se encuentra el origen de la referencia..]

Limitación del relleno poroso

El heat pipe se “seca” cuando la presión generada por capilaridad es insuficiente para impulsar el fluido del condensador al evaporador.

Para evitar esta situación, la presión capilar debe ser superior a la suma de las pérdidas de presión en el heat pipe. Dentro de éstas pérdidas están incluidas las pérdidas por fricción del líquido y vapor y el efecto de la gravedad (inclinación del heat pipe).

$$(\Delta P_C)_{max} \geq \Delta P_G + \Delta P_l + \Delta P_v$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\frac{2\sigma}{r_p} - \rho_l g L_{ef} \sin \phi = \frac{\mu_l L_{ef} \dot{m}_{max}}{\kappa \rho_l A_w} + \frac{64}{Re_{D_{hv}}} \frac{L_{ef}}{D_{hv}} \left(\frac{1}{2} \rho_v V_v^2 \right)$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{max} h_{fg}$$

$$\dot{Q}_{max} = \left(\frac{\rho_l \sigma h_{fg}}{\mu_l} \right) \left(\frac{KA_l}{l_{ef}} \right) \left(\frac{2}{r_p} - \frac{\rho_l g l_{ef} \sin \phi}{\sigma} \right)$$

\dot{Q}_{max} es el flujo máximo que puede transportar la estructura capilar sin que se produzca el quemado destructivo del evaporador.

Limitación sónica

En una tobera convergente un gas compresible se acelera hasta la velocidad del sonido debido al cambio de área; en un heat pipe el vapor puede acelerarse hasta la velocidad del sonido, añadiendo masa en el evaporador. Si el flujo de vapor en un heat pipe se ve obstruido, una disminución adicional en la temperatura del condensador no tiene efecto alguno sobre la temperatura del evaporador; así, existe una limitación sónica para el transporte axial de calor por unidad de área de la sección transversal del núcleo. La limitación sónica es de particular importancia en el funcionamiento de un tubo de calor de metal líquido en el extremo inferior de su intervalo de temperatura de trabajo a la cual la densidad de vapor es pequeña.

La limitación sónica puede aparecer al iniciarse la operación del tubo de calor, cuando el evaporador está frío, aunque no sea importante en el punto de operación considerado en el diseño.

$$\dot{Q}_s = 0.474 \cdot A_v \cdot h_{fg} \cdot (\rho_v \cdot P_v)^{0.5}$$

Limitación viscosa

Cuando el heat pipe opera a bajas temperaturas, la diferencia de presión de vapor entre el evaporador y el condensador puede llegar a ser extremadamente baja. En algunos casos, las fuerzas viscosas en la región de vapor pueden ser mayores que los valores de gradiente de presión. Cuando esto ocurre, los gradientes de presión en la zona de vapor no son suficientes para generar un flujo, resultando en un estancamiento del vapor.

El límite viscoso es más frecuente en heat pipes con regiones de condensador muy largas o dispositivos en los que las temperaturas de inicio son criogénicas o muy bajas.

El modelo asumido para su obtención es el de gas ideal e isotérmico para el vapor, flujo unidimensional y flujo laminar.

$$\dot{Q}_v = \frac{\pi \cdot r_v^4 \cdot h_{fg} \cdot \rho_v \cdot P_v}{12 \cdot \mu_v \cdot l_{ef}}$$

Limitación por arrastre

Si el flujo de cantidad de movimiento por unidad de área del vapor es suficientemente elevado, el esfuerzo que ejerce el vapor sobre la superficie del líquido puede bastar para generar ondas y arrancar gotitas de líquido de sus crestas. El arrastre de gotas de líquido provoca un aumento sustancial en la velocidad de circulación del fluido, y si la presión capilar no es suficiente el relleno poroso puede secarse repentinamente. El cociente del flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área del vapor y las fuerzas de tensión superficial que actúan sobre el líquido es proporcional al número de Weber:

$$We = \frac{\rho_v V_v^2 l}{\sigma}$$

donde L es el diámetro hidráulico de los poros de la superficie de relleno.

Relacionando la velocidad del vapor y el flujo de calor transportado de la siguiente forma:

$$v_v = \frac{Q}{A_v \cdot \rho_v \cdot h_{fg}}$$

Y asumiendo que para prevenir el arrastre de las gotas de líquido al flujo de vapor, el número de Weber debe ser inferior a la unidad, la capacidad máxima de transporte de calor sin que se produzcan fenómenos de arrastre queda definida como:

$$\dot{Q}_a = A_v \cdot h_{fg} \cdot \left(\frac{\rho_v \cdot \sigma_l}{2 \cdot r_p} \right)^{0.5}$$

Limitación por ebullición

En regímenes de transferencia de calor elevados, pueden aparecer fenómenos de ebullición, es decir, formación de burbujas en el relleno poroso que generarían zonas calientes que obstruyen el flujo del líquido. Mientras que las limitaciones de recubrimiento, sónicas y por arrastre restringen el flujo axial de calor, la limitación por ebullición impone una restricción sobre el flujo radial en el evaporador.

$$\dot{Q}_e = \frac{4\pi \cdot l_{ef} \cdot \lambda_{ef} \cdot T \cdot \sigma_l}{h_{fg} \cdot \rho_v \cdot \ln\left(\frac{r_i}{r_v}\right)} \cdot \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_{ef}} \right)$$

2.4. CÁLCULO DEL LÍMITE DE OPERACIÓN

Una vez descritas las características del proceso y las limitaciones del mismo, se va a proceder al cálculo del rango de aplicación del heat pipe en el caso concreto de tener que alimentar un conjunto de células AMTEC que desarrolle una potencia de 10 kW_e.

Para ello es necesario aplicar un conjunto de hipótesis o condiciones de las que se parte para elaborar el cálculo del límite de operación.

2.4.1. Supuestos

1. Proceso isotérmico

Presión y temperatura permanecen invariables en el interior del heat pipe a lo largo de su funcionamiento. En un estado de cambio de fase ideal dichas propiedades permanecen constantes. Sin embargo en aplicaciones reales se observa una variación de temperatura y presión. A efectos de cálculo se ha considerado una situación ideal.

2. Fluido incompresible

Se asume que el vapor es un fluido incompresible. Esta consideración implica que la velocidad del vapor es inferior a la velocidad del sonido.

$$\frac{v}{c} < 0.3$$

3. Niveles de evaporación y condensación ideales

Los ángulos de contacto en el evaporador y el condensador son respectivamente $\theta_e = 0^\circ$ y $\theta_c = 90^\circ$.

4. Malla capilar uniforme

En casos prácticos, la malla es más gruesa en el condensador, lo que le permite transportar mayor cantidad de fluido, y más fina en el evaporador para aumentar las fuerzas capilares.

5. Las propiedades del fluido permanecen constantes a lo largo del heat pipe

Partimos de que el fluido no se degrada a lo largo del proceso, por lo que sus propiedades termofísicas permanecen invariables.

6. Caída de presión de la fase vapor despreciable

A efectos de cálculo la caída de presión del vapor es de varios órdenes de magnitud inferior al resto de presiones que afectan a la conducción del fluido (decenas frente a miles), por lo que su efecto es omitido, simplificando así las operaciones.

7. Densidad de la mecha despreciable

Se asume que la estructura porosa es un canal hueco, es decir, a efectos de cálculo es equivalente a un tubo por el que circula el fluido. El cálculo de la masa de líquido real que puede circular por la mecha es:

$$m_l = (\rho_l - \rho_{mecha}) \cdot V_l$$

2.4.2. Fluido de trabajo

Una vez definido el proceso, se escoge el fluido de trabajo, así como sus propiedades termofísicas en el punto de operación.

Se selecciona el sodio, ya que las células AMTEC trabajan también con él, y por lo tanto, el rango de temperaturas de trabajo será el mismo para ambos sistemas. La Tabla 2.1 muestra las propiedades del sodio para un rango de temperatura.

A continuación hay que definir el punto de operación del heat pipe, en el que el fluido necesita un aporte de energía que produzca el cambio de fase en el evaporador.

El punto de evaporación del sodio es: $T(K) = 1154,7$, $P_v(bar) = 1,013$.

La temperatura de operación fijada para el diseño es de 1200 K. De este modo se asegura que el fluido esté en cambio de fase.

$T(K)$	$P_v(Pa)$	$\rho_l(kg \cdot m^3)$	$\rho_v(kg \cdot m^3)$	$\mu_l(N \cdot s \cdot m^{-2})$	$\mu_v(N \cdot s \cdot m^{-2})$	$\lambda_l(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\sigma_l(N \cdot m^{-1})$
800	876	825,6	0,00327	0,0002298	0,00001827	65,88	0,152
900	4876	801,8	0,0165	0,0002018	0,0000201	61,25	0,142
1000	19200	778	0,05998	0,0001809	0,00002211	56,6	0,132
1100	58428	754,2	0,1681	0,0001645	0,00002398	51,96	0,122
1200	146540	730,4	0,3966	0,0001514	0,00002577	47	0,112
1300	316500	706,6	0,8045	0,0001407	0,00002763	42,5	0,102
1400	609740	682,8	1,459	0,0001317	0,00002938	37,5	0,092
1500	1,072E+06	658	1,459	0,000124	0,00003117	33	0,082

Tabla 2.1 Propiedades termo-físicas del sodio ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

$$T(K) \quad h_{fg}(J \cdot kg^{-1})$$

800	4237000
900	4131000
1000	4026000
1100	3925000
1200	3829000
1300	3742000
1400	3656000
1500	3577000

Tabla 2.2 Propiedades termo-físicas del sodio.

2.4.3. Parámetros de diseño

Las Tabla 2.3 y, Tabla 2.4 muestran los parámetros dimensionales y materiales empleados en el heat pipe y su estructura capilar adoptados para el funcionamiento en las condiciones de trabajo exigidas por las células AMTEC.

Radio sección transversal de circulación de vapor	$r_v (m)$	0.01
Radio interior heat pipe	$r_i (m)$	0.009
Longitud evaporador	$l_e (m)$	0.1
Longitud adiabática	$l_{ad} (m)$	0.15
Longitud del condensador	$l_c (m)$	0.1
Longitud total del heat pipe	$l_t (m)$	0.35
Longitud eficaz del heat pipe	$l_{ef} (m)$	0.25
Área transversal de circulación de vapor	$A_v (m^2)$	0.0002545
Área transversal de la mecha	$A_l (m^2)$	0.00005969
Conductividad térmica del material del heat pipe	$\lambda_m (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	24

Tabla 2.3 Parámetros del heat pipe.

La longitud total del heat pipe queda determinada por la suma de las longitudes del evaporador condensador y zona adiabática (área de transporte):

$$l_t = l_e + l_{ad} + l_c$$

Como el flujo másico varía en las regiones del evaporador y el condensador, es preferible utilizar una longitud eficaz en lugar de la geométrica en dichas regiones. Si la variación de por unidad de longitud es constante, el caudal másico total aumenta o disminuye linealmente en el evaporador y el condensador. Por ello podemos sustituir l_e por $l_e/2$ y l_c por $l_c/2$.

$$l_{ef} = 0.5 \cdot (l_e + l_c) + l_{ad}$$

Las secciones transversales del vapor y el líquido se calculan como se indica a continuación:

$$A_v = \pi \cdot r_v^2$$

$$A_l = \pi \cdot (r_i^2 - (r_i - h)^2)$$

El material seleccionado para el tubo y la mecha es un INCONEL 625, debido a su capacidad de trabajar a elevadas temperaturas y a su compatibilidad con el fluido de trabajo (sodio).

Otros materiales que pueden emplearse en la mecha son aceros inoxidable serie 300, Incoloy 800, Inconel 600, 601, 718 y 625, Hayness 230, 188 y 214, Niquel and Hastelloy C, Titano, Tántalo, Molibdeno, Rubidio, Niobio y Tungsteno.

Los principales parámetros de la estructura capilar sinterizada son el nivel de porosidad, el diámetro de poro y el espesor de la misma. A partir de ellos se derivan el resto de parámetros que inciden en el cálculo.

Diámetro del poro	$d(m)$	0.0001
Porosidad	$\varepsilon(-)$	0.7
Anchura de la mecha	$h(m)$	0.001
Permeabilidad	$K(m^2)$	1.495e-10
Radio efectivo de la estructura capilar	$r_{ef}(m)$	0.000021
Conductividad térmica efectiva	$\lambda_{ef}(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	38

Tabla 2.4 Parámetros de la mecha en el heat pipe.

El radio de poro eficaz se calcula a través del diámetro del poro real:

$$r_{ef} = 0.21 \cdot d$$

La permeabilidad de la mecha depende fuertemente de la porosidad y diámetro de poro.

$$K = \frac{d^2 \cdot \varepsilon^3}{150 \cdot (1 - \varepsilon)^2}$$

La conductividad térmica eficaz de la mecha queda definida mediante la conductividad térmica del material que conforma el heat pipe y del fluido circulante y el nivel de porosidad.

$$\lambda_{ef} = \lambda_l \frac{2 \cdot \lambda_l + \lambda_m - 2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\lambda_l - \lambda_m)}{2 \cdot \lambda_l + \lambda_m + (1 - \varepsilon) \cdot (\lambda_l - \lambda_m)}$$

Una vez definidos y/o determinados los parámetros anteriores, se procede al cálculo y análisis de la capacidad del heat pipe.

2.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL HEAT PIPE

El resultado del cálculo de las limitaciones que afectan al funcionamiento del heat pipe queda reflejado en la Figura 9.

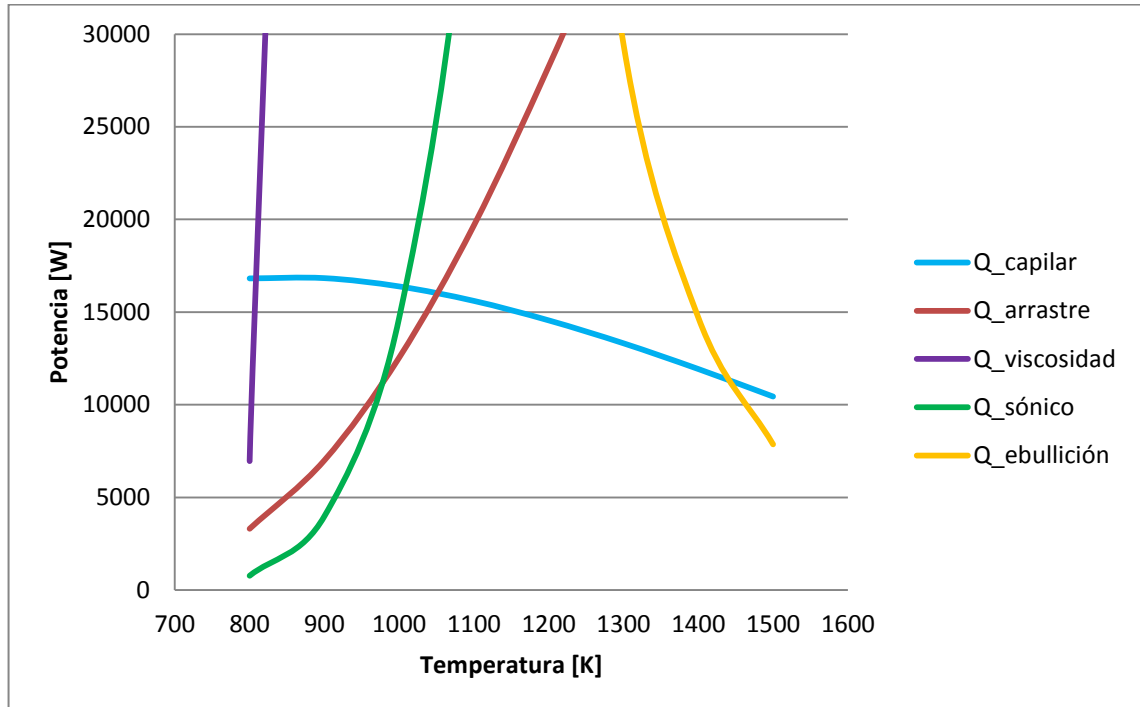


Figura 9 Potencia vs Temperatura.

Punto de trabajo:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura} &= 1200 \text{ K} \\ \text{Potencia (térmica)} &= 15000 \text{ W} \end{aligned}$$

Podemos observar en la gráfica que el heat pipe puede funcionar en estas condiciones al no verse afectado por los límites capilar, arrastre, viscoso, sónico, ebullición. Siendo el límite capilar el que marca la capacidad de trabajo del heat pipe.

Esta solución se ha obtenido, a través del estudio de los parámetros de diseño, con la finalidad de dar respuesta a la alimentación energética de células AMTEC.

Potencia eléctrica producida

Con una eficiencia de conversión termo-eléctrica del 25-30% las células AMTEC convierten 15.000 W de energía térmica en unos 4.000 W de energía eléctrica.

Para una producción de 10.000 W eléctricos se requieren 3 heat pipes agrupados en cada sistema AMTEC-disco parabólico, según el diseño establecido.

La variación de los parámetros permite la obtención de diferentes heat pipes que responderían a la aplicación propuesta. Por lo que en cada caso se debe analizar qué otras limitaciones afectan a los parámetros de diseño, como pueden ser las económicas, espaciales, disponibilidad, estructurales...

Es deseable la elección de un conjunto de heat pipes en lugar de una única unidad, con la finalidad de poder distribuir el calor de forma más uniforme a las células.

A continuación se puede observar cómo influye la variación individual de cada parámetro en el punto de operación.

Porosidad

Influye en gran medida sobre la potencia desarrollada por el heat pipe. Una mecha con un nivel bajo de porosidad implica un reducido transporte de fluido (baja permeabilidad), por el contrario un nivel alto de porosidad proporciona un caudal másico mayor entre condensador y evaporador.

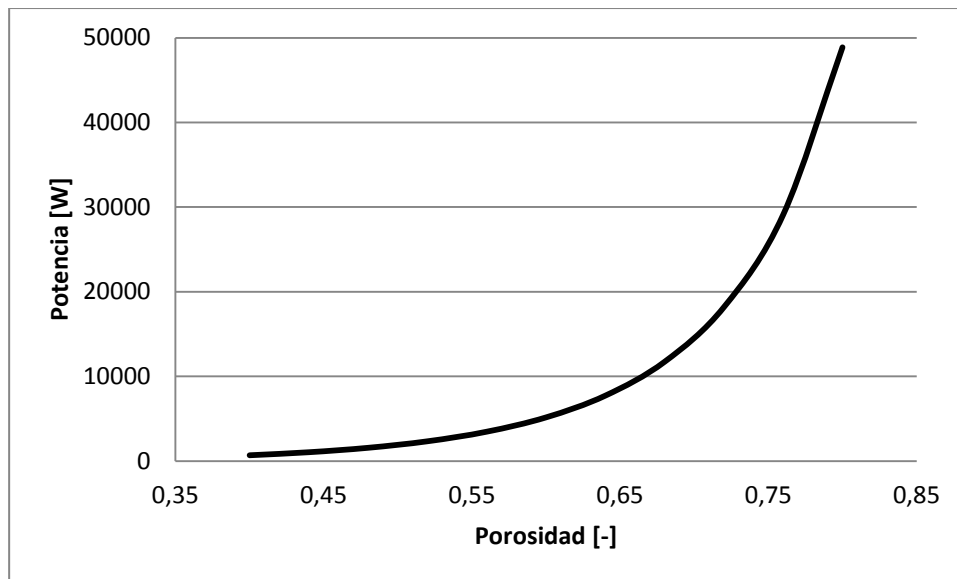


Figura 10 Potencia vs Porosidad.

Diámetro de poro

El diámetro de los poros distribuidos en la mecha puede ser optimizado, alcanzando un valor en torno a las 60 micras. Esta variable de diseño, afecta a la permeabilidad de la mecha y las fuerzas capilares.

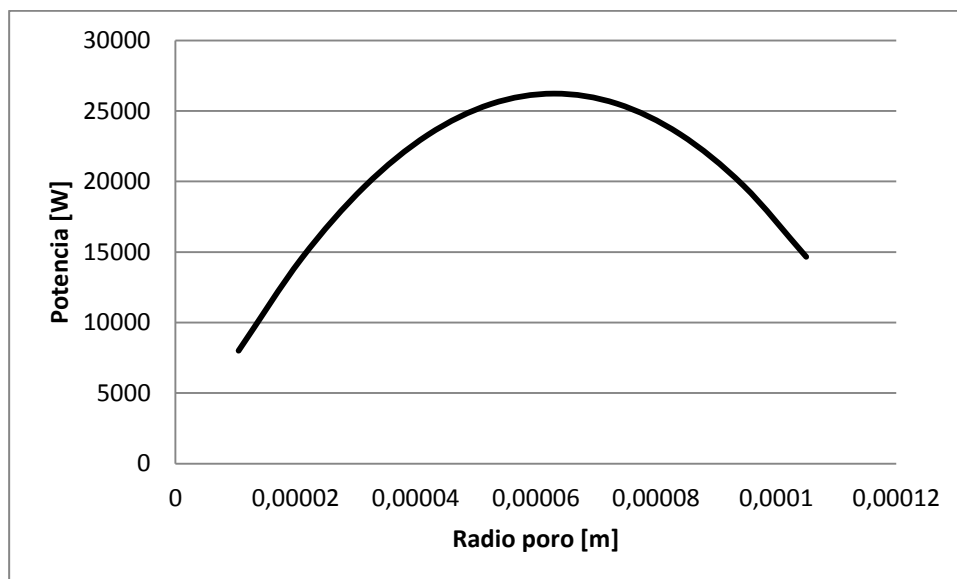


Figura 11 Potencia vs Radio de poro.

Como puede verse en la Figura 11, radios de poro bajos afectan reduciendo la capacidad de transporte de fluido, por otra parte, valores elevados disminuyen las fuerzas capilares.

Espesor de la mecha

Del mismo modo que el nivel de porosidad, aunque en menor medida, el espesor de la mecha favorece el transporte de flujo másico al verse incrementado, ya que el fluido dispone de una mayor área transversal para circular en el interior del heat pipe.

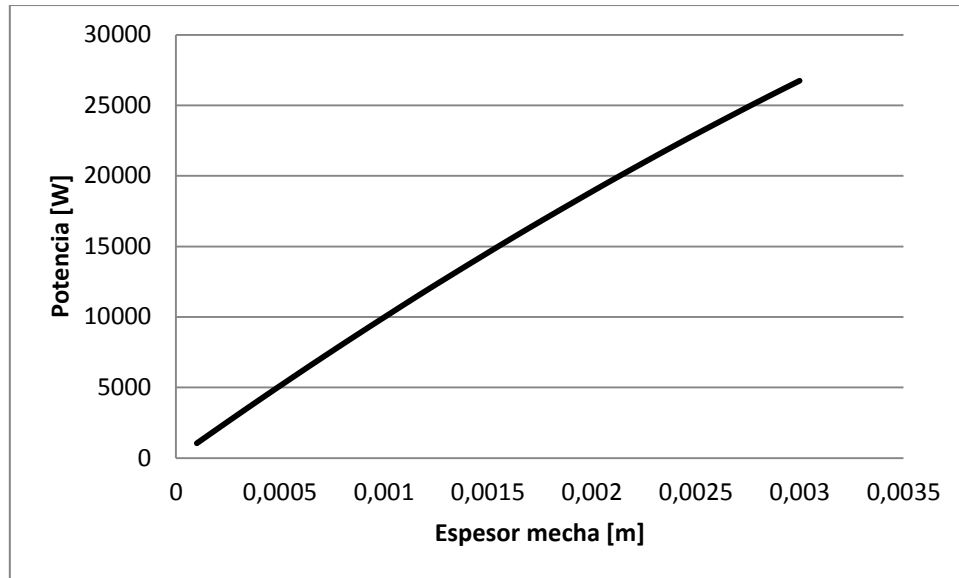


Figura 12 Potencia vs Espesor de la mecha.

Longitud del heat pipe

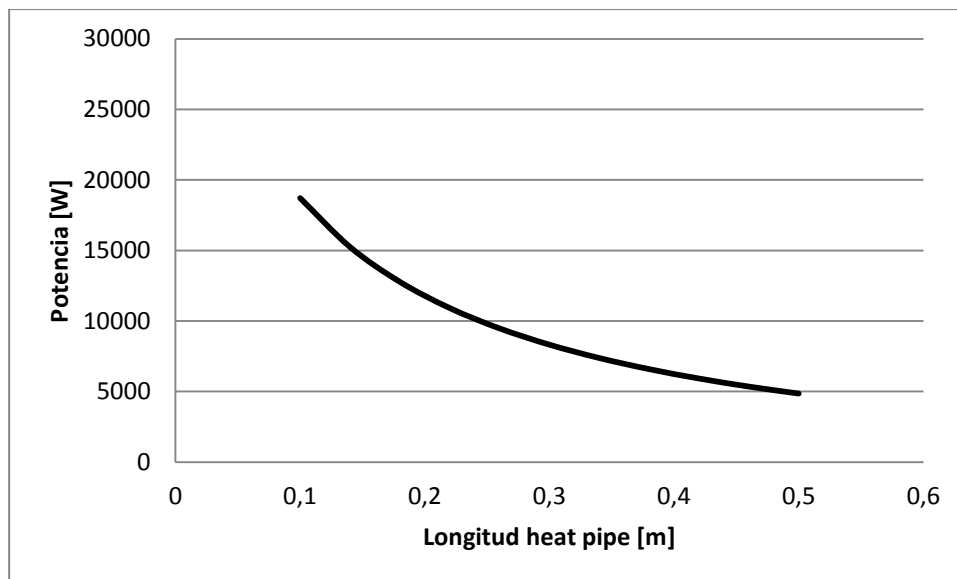


Figura 13 Potencia vs Longitud heat pipe.

Incrementando la longitud del heat pipe se observa una disminución de la potencia (Figura 14), la explicación a esta tendencia es la caída de presión que sufre el fluido debido a la fricción producida en la circulación de sodio por la estructura capilar.

Inclinación del heat pipe

Al aumentar la inclinación del heat pipe, partiendo de que el evaporador se encuentra en una cota inferior respecto al condensador, genera una influencia creciente de la fuerza de la gravedad. La Figura 15 indica que este factor afecta en menor medida que los anteriores, sin embargo, no es despreciable, puesto que en configuraciones en las que las mallas porosas producen fuerzas capilares menores (radios de poro mayores), que las aquí definidas, la inclinación ve incrementada su influencia en gran medida.

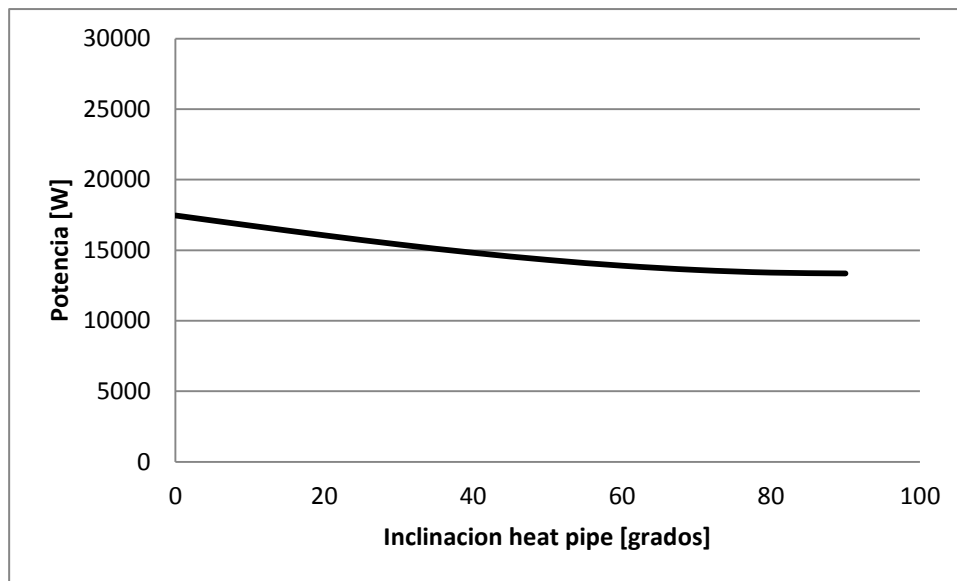


Figura 15 Potencia vs Inclinación heat pipe.

2.5.1. Sumario

Las consecuencias de la variación de los parámetros de diseño que se ha presentado gráficamente en el apartado anterior, queda en éste reflejada tubularmente Tabla 2.5 y Tabla 2.6. El signo (+) indica que potencia aumenta con el aumento del factor analizado, (-) disminuye con el aumento del factor y (o) existencia de un punto óptimo.

<i>Parámetros dimensionales</i>	<i>Influencia sobre \dot{Q}_{max}</i>
r_p	(o) \dot{Q}_{max} alcanza un valor óptimo, si el tamaño de los poros aumenta, ello redonda en un aumento del caudal de fluido circulante (aumenta su permeabilidad K), sin embargo las fuerzas capilares que impulsan el fluido se ven reducidas.
l_{ef}	(-) \dot{Q}_{max} disminuye con el aumento de la longitud del heat pipe l_{ef} . Las pérdidas por fricción son directamente proporcionales a las distancia a recorrer por el fluido.
ϕ	(-) \dot{Q}_{max} disminuye con el aumento de la inclinación del heat pipe a causa del efecto de la gravedad.
A_l	(+) \dot{Q}_{max} aumenta al incrementar el área transversal del líquido (mediante el aumento del espesor de la mecha o aumento del radio interior del tubo) $A_l = \pi \cdot (r_i^2 - (r_i - h)^2)$ Asumimos que la densidad permanece constante, siendo variable la masa conforme al cambio del volumen.

Tabla 2.5 Parámetros dimensionales del heat pipe.

<i>Selección del fluido</i>	<i>Influencia sobre \dot{Q}_{max}</i>
μ_l	(-) \dot{Q}_{max} disminuye con el aumento de la viscosidad del fluido. Una elevada viscosidad genera un aumento de las fuerzas de fricción a su paso por la estructura porosa.
σ	(+) \dot{Q}_{max} aumenta con el aumento de la tensión superficial. Una elevada tensión superficial produce un aumento de las fuerzas capilares.
h_{fg}	(+) \dot{Q}_{max} aumenta al incrementar el calor latente de vaporización, ya que el fluido libera una mayor cantidad de energía.

Tabla 2.6 Propiedades del fluido de trabajo.

3. CONCLUSIONES

Los sistemas disco parabólico/AMTEC se presentan como una alternativa novedosa y competitiva a las tecnologías disponibles en el mercado termosolar, con eficiencias en torno al 20%, elevadas densidades de potencia (0.5 kW/kg), ausencia de partes móviles y por tanto de vibraciones que les confiere mayor fiabilidad, diseño modular que les permite acoplar varias células para conformar unidades de mayor generación de potencia, así como el funcionamiento de cada célula con independencia del resto. Este sistema incluye un receptor-heat pipe, que transfiere la energía solar isotérmicamente del disco parabólico a las células AMTEC.

La eficiencia de conversión termo-eléctrica de este sistema ha sido analizada durante el funcionamiento del AMTEC. Los resultados muestran que la eficiencia máxima de conversión termo-eléctrica alcanza un máximo de 20.6% produciendo 18.54 kW correspondientes a una temperatura de operación de 1280 K.

Sin embargo la caída en la generación de potencia del AMTEC a lo largo de su vida útil se reduce casi a la mitad. Los estudios realizados muestran que el BASE y los electrodos son los dos componentes que experimentan una mayor degradación en el AMTEC, siendo el electrolito sólido el responsable en un 50% y los electrodos en un 15% del total de pérdidas asociadas a su funcionamiento. La vida útil de los electrodos depende del grado de sinterizado del material, que a su vez depende de la temperatura de trabajo y de las propiedades del material. El deterioro de los electrodos se debe principalmente al crecimiento de grano, por otra parte la degradación térmica y contaminación química que sufre el electrolito sólido se traduce en un aumento de su resistencia al paso de los iones.

El desgaste sufrido por las células AMTEC reduce su competitividad respecto al resto de tecnologías del sector termosolar, sin embargo la mejora del sistema actual puede impulsar este dispositivo, ya que una de sus principales ventajas es el coste de producción y generación, muy inferior al generado por los motores Stirling/disco parabólico.

La aplicación de la tecnología heat pipe como nexo de unión entre el disco parabólico y las células AMTEC se debe a su sencillo diseño y elevada capacidad de transferencia de calor. Con la finalidad de alimentar células AMTEC para una producción de 10 kWe, se han escogido los parámetros dimensionales del heat pipe (sección transversal y longitudinal, configuración de la estructura porosa interna e inclinación del tubo) y el fluido circulante (sodio). Para comprobar que éstos parámetros cumplen de forma satisfactoria las especificaciones iniciales, ha sido necesario analizar la capacidad del heat pipe a través de las restricciones derivadas de su funcionamiento, que son las limitaciones asociadas al relleno poroso, sónica, viscosidad del fluido, arrastre y ebullición. Los resultados muestran una solución conforme, que no es única, por lo que una variación de forma conjunta de los parámetros resulta en una amplia gama de heat pipes que cumplan con los requisitos propuestos.

Podemos concluir que tras los primeros estudios realizados recientemente, las células AMTEC se presentan como una alternativa de futuro que generan un menor costo y permite junto con el empleo de heat pipes y el disco parabólico una eficiencia más que aceptable en el sector de la energía termosolar.

4. LINEAS FUTURAS

El principal inconveniente de las células AMTEC es su pérdida de eficiencia a lo largo de su funcionamiento, cuyo principal responsable es el electrolito sólido. El deterioro del material tiene como consecuencia un aumento de la resistencia del mismo a la circulación de iones de sodio, por lo que un análisis de las causas asociadas a este hecho es fundamental para conseguir una notable mejora del dispositivo. Una comparativa entre diversos electrolitos sólidos fabricados a partir de beta alúmina, con diferentes grados de elementos dopantes para la mejora de la conducción iónica, podría ser un primer paso en el desarrollo de este material. Por ello, una mejora en el comportamiento del electrolito sólido produciría el avance más importante en el diseño de las células AMTEC.

El otro elemento que afecta en gran medida al funcionamiento del dispositivo, son los electrodos, donde los estudios muestran que un refinamiento de grano podría incrementar sus prestaciones, ya que la conducción de los electrones se produce a través de los bordes de grano. Siendo de gran importancia la reducción o ralentización del crecimiento de grano para una mejora del rendimiento.

En el caso del heat pipe, resultará de especial interés que configuración y agrupación de heat pipes produce una mayor transmisión energética a las células, puesto que los parámetros de diseño deben ajustarse a los dispositivos comerciales. El número óptimo de heat pipes así como la distribución sobre la superficie de contacto con las células AMTEC debe ser uno de los objetivos prioritarios a desarrollar en siguientes proyectos.

Finalmente y como conclusión personal, el desarrollo de dispositivos y sistemas de generación eléctrica térmica solar, se torna transcendental en nuestro país y situación actual, con ello principalmente se pretende reducir la dependencia energética, así como el aprovechamiento de recursos disponibles, inagotables y limpios como es la energía solar. Al mismo tiempo el impacto social es notable, gracias a la creación de empleo y al desarrollo de las áreas donde se localizan las plantas termosolares.

Por otra parte el desarrollo que se está llevando a cabo en el almacenaje de energía térmica a través de depósitos de sales fundidas, permite aventajar al resto de competidores en el sector de las energías renovables y presentarse como una garantía de generación de valor energético, económico, social y medioambiental.