



ANEXOS



Anexos

| | |
|---|-----------|
| 1. ANEXO 1 | 4 |
| 1.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL | 4 |
| 1.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA ESPAÑOLA | 6 |
| 1.3. TECNOLOGÍA TERMOSOLAR | 9 |
| 1.3.1. Propuestas de valor en las centrales termosolares..... | 10 |
| 1.3.2. Soluciones tecnológicas | 10 |
| 1.3.3. Centrales de canal parabólico..... | 11 |
| 1.3.4. Centrales de receptor central o de torre con campo de helióstatos... | 12 |
| 1.3.5. Centrales de reflectores lineales tipo fresnel | 12 |
| 1.3.6. Centrales de discos parabólicos con motores stirling..... | 13 |
| 1.3.7. Sistemas de almacenamiento..... | 14 |
| 1.3.8. Requerimientos de agua y refrigeración..... | 14 |
| 1.3.9. Situación de la solar termoeléctrica..... | 15 |
| 1.3.10. Impacto ambiental | 15 |
| 1.3.11. Reducción de la dependencia energética | 16 |
| 2. ANEXO 2. EFICIENCIA AMTEC..... | 17 |
| 2.1. EFICIENCIA DE CONVERSIÓN TERMOELÉCTRICA DISCO PARABÓLICO/AMTEC..... | 17 |
| 2.1.1. Eficiencia térmica del colector solar | 17 |
| 2.1.2. Eficiencia de conversión del AMTEC..... | 20 |
| 2.1.3. Parámetros influyentes en la eficiencia del sistema disco/AMTEC. | 23 |
| 3. ANEXO 3. PÉRDIDA DE EFICIENCIA AMTEC..... | 29 |
| 3.1. PÉRDIDAS OCASIONADAS DURANTE EL FUNCIONAMIENTO AMTEC | 29 |
| 3.1.1. Pérdidas electroquímicas | 29 |



| | |
|---|-----------|
| 3.1.2. Pérdidas térmicas | 30 |
| 3.2. DEGRADACIÓN DE LOS ELECTRODOS | 30 |
| 3.2.1. Características | 30 |
| 3.2.2. Degradación del cátodo | 31 |
| 3.2.3. Modelo de movilidad de las fronteras de grano | 32 |
| 3.2.4. Relación entre tamaño de grano, corriente de intercambio y potencia generada | 36 |
| 3.3. ELECTROLITO SÓLIDO | 39 |
| 3.3.1. Estructura..... | 39 |
| 3.3.2. Defectos puntuales | 41 |
| 3.3.3. Conductividad iónica..... | 42 |
| 3.3.4. Tipos de degradación..... | 43 |
| 3.3.5. Modelado del rendimiento del BASE | 45 |
| 4. ANEXO 4. CICLO TERMODINÁMICO AMTEC..... | 48 |
| 4.1. CICLO TERMODINÁMICO DEL FLUIDO | 48 |

1. ANEXO 1

1.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL

Desde el advenimiento de la producción en línea y la automatización de procesos que se desarrolló en la revolución industrial, el consumo energético mundial ha crecido de forma pronunciada. En 1890 el consumo de combustibles fósiles alcanzó al de biomasa utilizada en la industria y en los hogares. En 1900, el consumo energético global supuso 0,7 TW. A día de hoy dicha demanda se ve cubierta, como podemos observar en la Figura 1, con la producción de 12717.16 Mtoe en términos de energía primaria.

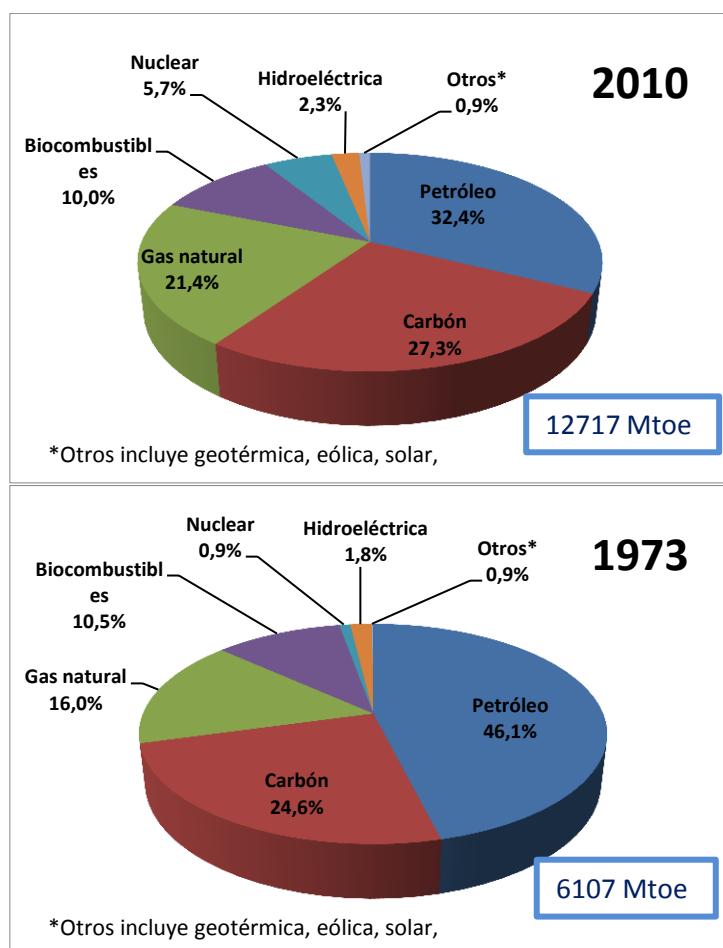


Figura 1 Suministro total de energía primaria 1973-2010 [15].

Como podemos observar en los datos obtenidos por la Agencia de Energía Internacional (IEA) Tabla 1.1, en 40 años la producción energética se ha visto doblada en cantidad, siendo los combustibles fósiles los que gobiernan el actual modelo energético.

Datos de 2010 (IEA) Producción Energética (Mtoe)

| | |
|-----------------|---------|
| Petróleo | 4159.37 |
| Gas Natural | 2727.61 |
| Carbón | 3475.77 |
| Nuclear | 718.96 |
| Hidroeléctrica | 295.62 |
| Biocombustibles | 1278.03 |
| Otras* | 113.71 |

*(eólica, solar, geotérmica, termoeléctrica)

Tabla 1.1 Producción de energía primaria mundial [15].

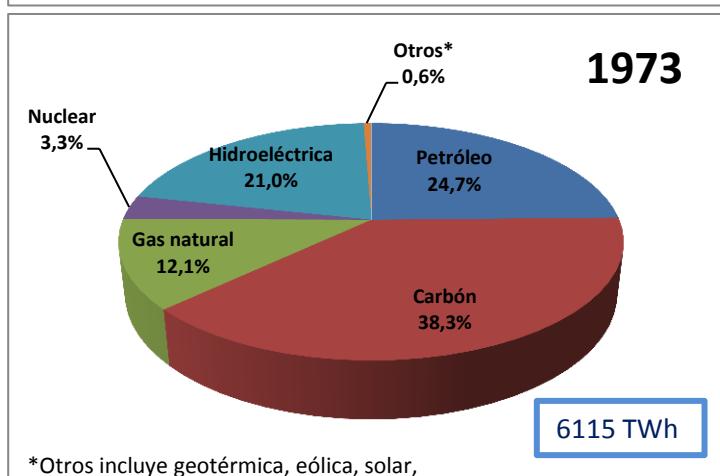
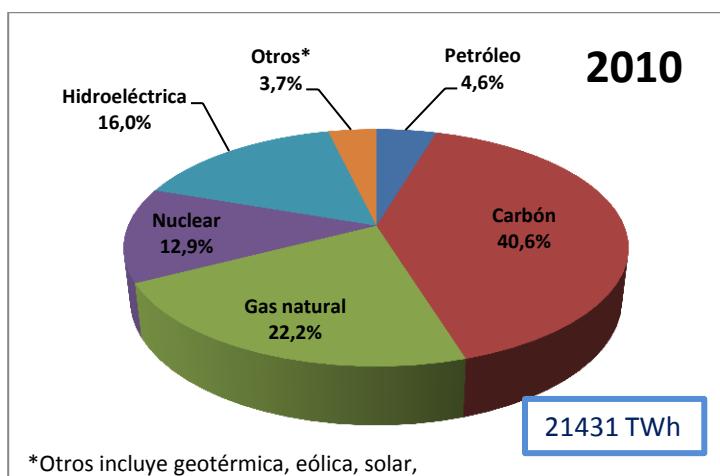


Figura 2 Electricidad generada por combustibles en % [15].

Los recursos energéticos son transformados para la generación de energía final:

- Calor (J)
- Electricidad (W)

El sector del transporte desarrollado en base a los motores de combustión interna demanda prácticamente la totalidad del petróleo (3964.42Mtoe), tratado éste en refinerías para su posterior uso como combustible.

La producción de electricidad depende en gran medida de las centrales térmicas alimentadas por combustibles fósiles, siendo mayoritario el uso de carbón (1974.87 Mtoe) seguido por la energía nuclear (715.16 Mtoe) y gas natural (705.47Mtoe).

En la actualidad la inversión en el desarrollo de las energías renovables es prioritaria en los países desarrollados (OECD) debido al incremento del precio del crudo, problemas geopolíticos en los países exportadores, aumento de la demanda de países en vías de desarrollo, reducción de emisiones, contaminación (efecto invernadero) y políticas de abandono de la energía nuclear en el caso de Europa.

Por ello, la tendencia a diversificar las fuentes de producción va en aumento, con el intento de cada país de obtener independencia energética en vista de sus recursos. Potenciando el uso de energías renovables que cuentan con importantes ventajas, como son su disponibilidad permanente, reducción de contaminantes y CO₂ expulsados al medio ambiente, generación de empleo, desarrollo económico e industrial de las zonas en las cuales son instaladas. Por otra parte, como principales desventajas podemos indicar que la inversión inicial es elevada y los costes de producción (€/KWh) son poco competitivos.

1.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA ESPAÑOLA

En este apartado vamos a describir la situación, desarrollo e implantación del sector energético en España.

Históricamente, uno de los elementos que ha limitado el desarrollo económico de España ha sido la pobreza de recursos energéticos, en concreto la carencia de hidrocarburos líquidos y gaseosos y la mala calidad y carestía del carbón existente. La escasez de recursos ha condenado tradicionalmente al sistema energético nacional a una situación de déficit y dependencia exterior.

Con una población de algo más de 47 millones de habitantes y un producto interior bruto de 1.3977 trillones de dólares americanos, España produce 34.24 Mtoe e importa (neto) 106.84 Mtoe de energía primaria. El consumo de electricidad es igual a 283.56 TWh (datos año 2010).

Dada la debilidad y la dependencia del sector energético español, vamos a analizar y describir cuales son las necesidades y de qué forma se están gestionando hasta el momento los recursos nacionales.

La energía primaria consumida es principalmente de origen fósil: petróleo (casi la mitad), gas natural (alrededor del 25%), nuclear, carbón y renovables contribuyen con un 10% individualmente, Tabla 1.2.

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA (kTep)

| AÑO 2011 | |
|----------------------------|----------------|
| Petróleo | 58.317 |
| Carbón | 12.456 |
| Gas natural | 28.930 |
| Biomasa, biocarb. y resid. | 7.280 |
| Nuclear | 15.024 |
| Hidraúlica | 2.631 |
| Eólica, Solar y Geot. | 5.226 |
| Saldo imp-exp electricidad | -524 |
| TOTAL | 129.340 |

Tabla 1.2 Consumo de energía primaria (ktep) [15].

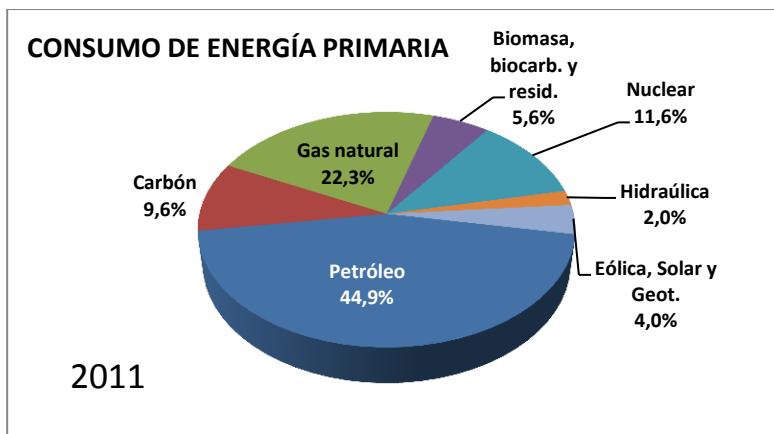


Figura 3 Consumo de energía primaria en % [15].

En cuanto a la energía producida en el país la principal fuente es de origen nuclear (48.6%) seguida de cerca por las renovables (43.4%), Tabla 1.3.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA (kTep)

| AÑO 2011 | |
|----------------------------|---------------|
| Petróleo | 101 |
| Carbón | 2.287 |
| Gas natural | 45 |
| Biomasa, biocarb. y resid. | 5.615 |
| Nuclear | 15.024 |
| Hidraúlica | 2.631 |
| Eólica, Solar y Geot. | 5.226 |
| TOTAL | 30.929 |

Tabla 1.3 Producción de energía primaria (ktep) [15].

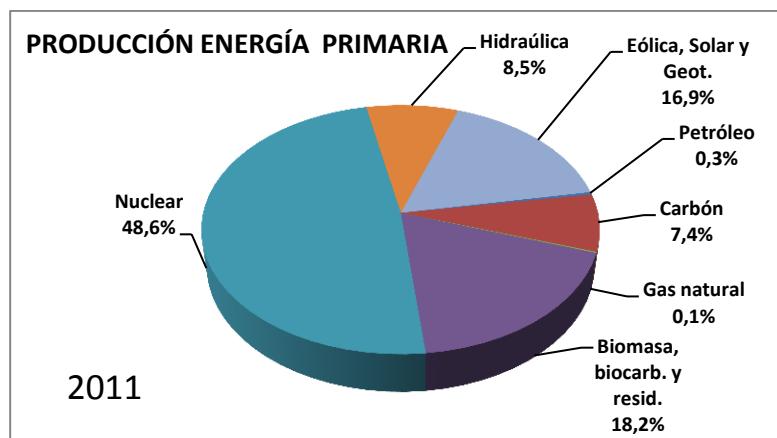


Figura 4 Producción de energía primaria en % [15].

1.3. TECNOLOGÍA TERMOSOLAR

Las regiones con mayor potencial son los desiertos del norte de África y Suráfrica, Medio Oriente, el noroeste de India, el sur de Estados Unidos, México, Perú, Chile, el oeste de China, Australia y el sur de Europa, aunque en nuestro país se dispone de aproximadamente $2000 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ frente a $2600 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ en los otros emplazamientos citados con mayor recurso solar de nuestro planeta.

La energía aprovechable se mide en términos de irradiación directa normal, que se define como la energía que llega a la superficie perpendicular a los rayos de sol en un periodo de tiempo determinado, como refleja la Figura 5 y Figura 6. En la actualidad, los límites mínimos necesarios para la rentabilidad de una de estas centrales serían algo superiores a los $1900 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$.

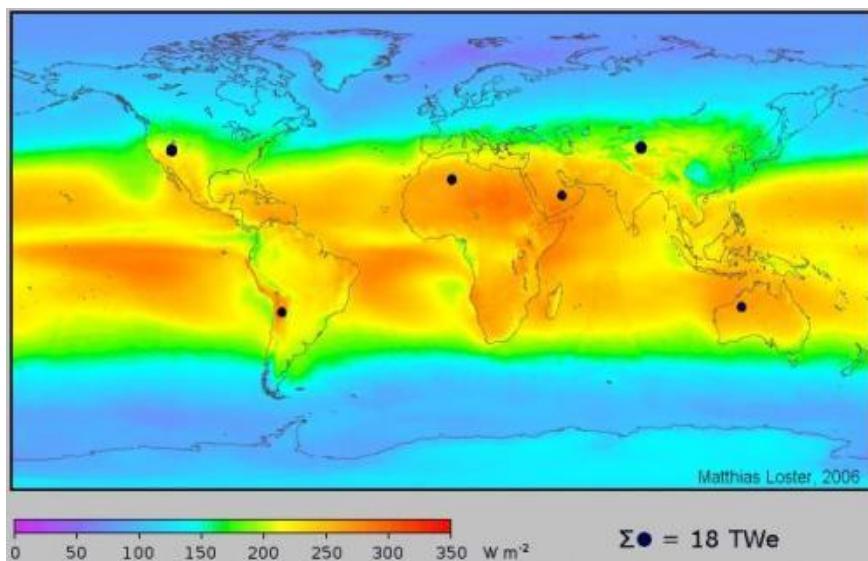


Figura 5 Niveles de irradiación terrestres (W/m^2) [8].

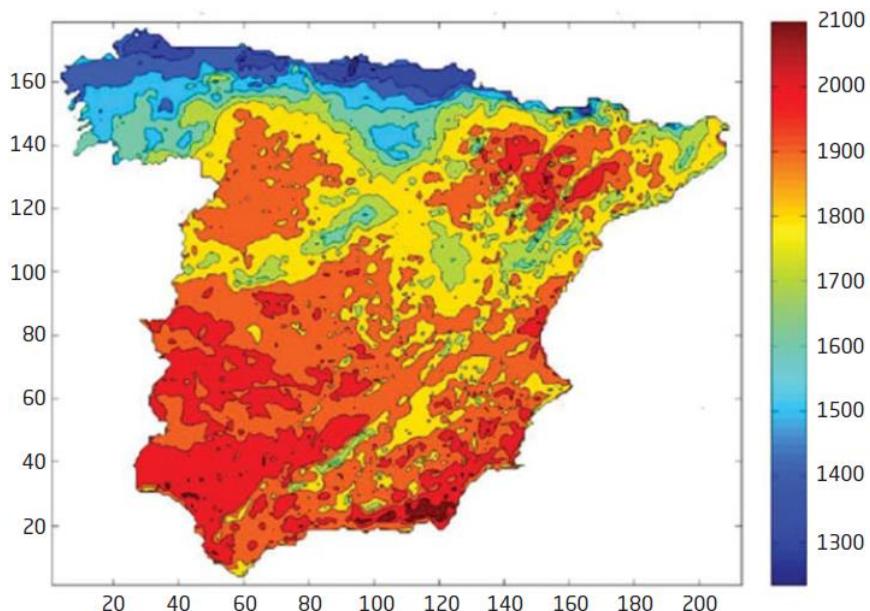


Figura 6 Mapa de Radiación Directa Normal Anual ($\text{kWh/m}^2/\text{año}$) [11].

1.3.1. Propuestas de valor en las centrales termosolares

En primer lugar, la energía solar termoeléctrica es gestionable y puede verter electricidad al sistema incluso en momentos en los que no se dispone de radiación solar haciendo uso de los sistemas de almacenamiento o de hibridación de las centrales. Esta característica dota a la solar termoeléctrica de una mayor flexibilidad que otras tecnologías renovables, contribuyendo así facilitar la gestión del seguimiento de la demanda por parte del operador del sistema eléctrico. Adicionalmente, la interfaz con la red en las centrales termosolares la constituyen equipos generadores de gran inercia mecánica que contribuyen a su estabilidad en el caso de incidencias de corta duración.

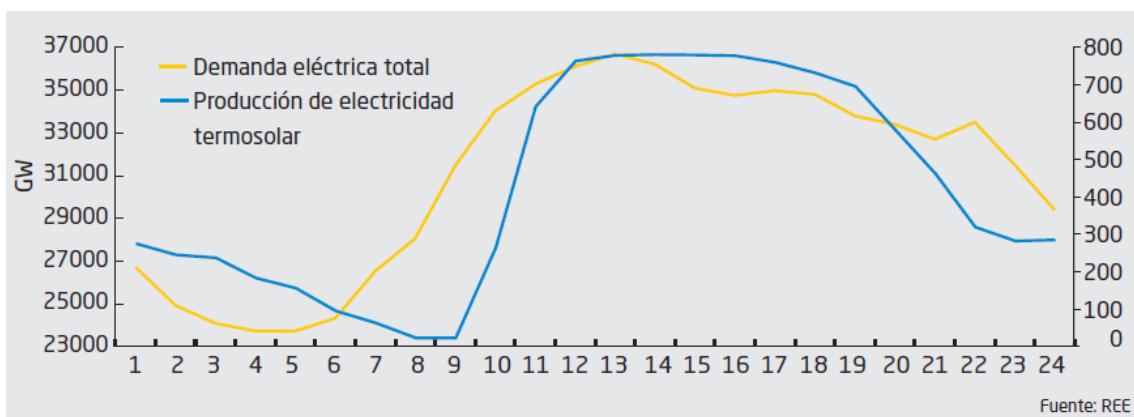


Figura 7 Demanda de energía eléctrica y producción termo solar. 28 Julio 2011 (GW) [21].

Al poder ser fácilmente hibridadas con otras formas energéticas renovables, como la biomasa y combustibles fósiles como el gas natural, utilizando el mismo equipo generador, se aumenta considerablemente la eficiencia y la firmeza en la producción de energía eléctrica.

La producción de electricidad mediante la utilización de estas tecnologías evita la emisión de gases de efecto invernadero, mitiga los efectos que estos gases tienen en el cambio climático y ayuda a conseguir los objetivos de reducción de emisiones.

Al mismo tiempo, al utilizar un recurso que se localiza en el territorio contribuye a la reducción de las importaciones de combustibles fósiles desde el extranjero. Esto tiene ventajas que van más allá del ahorro que producen en términos económicos, ya que también se reduce el riesgo de impactos negativos asociados a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, así como a la propia vulnerabilidad energética. Esta ventaja es especialmente importante en España, al ser uno de los países europeos con mayor dependencia energética del extranjero.

1.3.2. Soluciones tecnológicas

Categorizadas según la manera en la que concentran la irradiación directa del sol:

- Canal parabólico
- Receptor central o de torre con campo de heliostatos

- Reflectores lineales tipo *Fresnel*
- Discos parabólicos con motores *Stirling*

1.3.3. Centrales de canal parabólico

Consiste en instalar filas o lazos de espejos con forma de canales de sección parabólica que recogen la radiación solar y la concentran en un tubo receptor. Aquí se calienta un fluido hasta aproximadamente 400°C y se utiliza posteriormente, bien para generar vapor que acciona una turbina conectada a un generador de electricidad, bien para calentar un sistema de almacenamiento consistente en dos tanques de sales fundidas. Alternativamente, existe también la posibilidad de que la energía térmica obtenida de la transformación termosolar genere vapor directamente en el campo solar, eliminando la necesidad de intercambiadores de calores y de otros fluidos. Las filas de concentradores en estas centrales suelen tener una orientación norte-sur para maximizar la cantidad de energía recogida durante todo el año, ya que con un sistema de un único eje puede ajustarse su inclinación de este a oeste durante el día, lo cual asegura una incidencia más favorable de la irradiación directa del sol a los espejos. Asimismo, esta tecnología permite incorporar sistemas de almacenamiento térmico para utilizarse en momentos en los que no existe irradiación solar.



Figura 8 Central de canal parabólico [12].

Por otra parte, esta tecnología permite también soluciones bastante sencillas de hibridación con otras tecnologías, lo cual significa que puede utilizarse un combustible fósil tradicional o biomasa para producir electricidad durante la noche o en días nublados, así como para apoyar la operación solar. Las ventajas de la hibridación es que se maximiza el uso de las turbinas de generación de electricidad, existiendo economías de escala en muchas fases del proyecto, tanto durante la construcción (por ejemplo en las líneas eléctricas) como durante la operación.

En la actualidad las centrales en España tienen una potencia unitaria de 50 MW, por los condicionantes del régimen especial.

1.3.4. Centrales de receptor central o de torre con campo de helióstatos

Las centrales de torre o de receptor central utilizan cientos o miles (dependiendo del tamaño de éstos y de la potencia) de reflectores planos —o casi— llamados helióstatos que dirigen la radiación solar hacia un receptor ubicado en la parte superior de una torre. Un fluido utilizado como transmisor de calor, que en las centrales actuales puede ser vapor o sales fundidas, es calentado en el receptor y se utiliza para generar electricidad mediante una turbina de vapor convencional.

El rendimiento de estas centrales suele ser mayor que el de las de canal parabólico, ya que se consiguen temperaturas más elevadas de los fluidos, entre 500°C y 600°C, lo que da lugar a mayor rendimiento termodinámico y a su vez facilita también la capacidad de almacenamiento, disminuyendo el volumen necesario.



Figura 9 Torre con campo de heliostatos [8].

1.3.5. Centrales de reflectores lineales tipo fresnel

Esta tecnología también se basa en filas o lazos de reflectores solares; no obstante, en este caso son planos o con una curvatura muy pequeña. La radiación se refleja y se concentra en unos receptores ubicados sobre los espejos. La principal ventaja de esta tecnología es que se facilita la generación directa de vapor, principalmente por tener el tubo absorbedor fijo, eliminándose la necesidad de fluidos para la transferencia de calor y los intercambiadores de calor. En la actualidad esta tecnología se encuentra menos extendida, ya que el nivel de concentración y correspondientemente la temperatura que alcanza el fluido en el campo solar hasta ahora vapor saturado, es inferior a las otras dos

tecnologías mencionadas anteriormente y resulta más difícil incorporar sistemas de almacenamiento. Su desarrollo dependerá de la capacidad de reducir los costes de inversión y de generación a fin de ser competitivos ante su menor rendimiento: se estima que los costes deberían ser un 40% inferiores a los de canal parabólico para poder ser competitivos con esa tecnología.



Figura 10 Reflectores lineales tipo Fresnel [18].

1.3.6. Centrales de discos parabólicos con motores stirling

Las centrales de discos parabólicos con motores *Stirling* constan de dos elementos básicos: un concentrador o disco solar y un generador de energía. Cada unidad completa produce electricidad por sí misma y la potencia de los dispositivos actuales varía desde los 3 kW hasta los 25 kW por unidad, con una versión de 10 kW.

Los concentradores recogen la radiación solar directamente y la reflejan en un receptor que se ubica sobre el disco. La estructura gira siguiendo al sol para que se produzca la concentración de los rayos solares en el foco en donde se encuentra dicho receptor acoplado al motor. El tipo más común de transformadores termomecánicos empleados son los motores *Stirling* conectados a un alternador. El motor Stirling utiliza un gas calentado, generalmente helio o hidrógeno, para generar energía mecánica en su eje.

Este diseño elimina la necesidad de utilizar agua en la generación de Energía. Los discos parabólicos no parecen, en la actualidad, tan adecuados como las otras tecnologías para su utilización en grandes centrales pero sí podrían suponer una solución para la generación distribuida al ser modulares y más fáciles de localizar en terrenos no planos.

**Figura 11 Disco solar parabólico/motor Stirling [16].**

1.3.7. Sistemas de almacenamiento

La energía solar termoeléctrica ofrece soluciones en este terreno, ya que la energía que se recoge puede ser almacenada en forma de energía interna de una sustancia. Si el fluido utilizado para la transmisión del calor desde el campo solar hasta el generador es aceite o sales fundidas, la energía recogida puede ser almacenada para su posterior utilización durante la noche o días nublados.

Las centrales con capacidad de almacenamiento suelen tener hasta siete horas y media adicionales, que sólo se alcanzan en operación normal durante los meses del verano, permitiendo extender la operación de las centrales termosolares y haciéndolas más competitivas al alcanzar factores de capacidad cercanos al 50%.

1.3.8. Requerimientos de agua y refrigeración

Las centrales termosolares emplean habitualmente un suministro de agua constante para procesos de enfriamiento del condensador del ciclo de vapor, aunque también pueden diseñarse centrales termosolares con sistemas de refrigeración seca, si bien su rendimiento se verá ligeramente disminuido. En este sentido, si bien depende de la tecnología utilizada, la energía solar termoeléctrica necesita aproximadamente 3000 litros de agua por MWh1, ratios similares a los de una central nuclear, frente a los 2000 u 800 litros por MWh de las centrales de carbón o ciclos combinados de gas natural, respectivamente.

1.3.9. Situación de la solar termoeléctrica

A finales del año 2010, la potencia solar termoeléctrica instalada en España era de 531,5 MW, habiendo experimentado un crecimiento con respecto al año anterior de 299,8 MW.

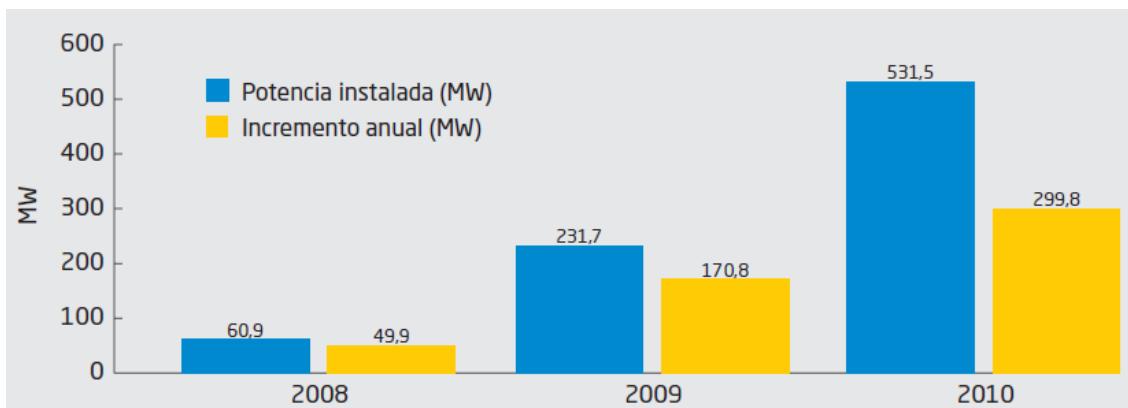


Figura 12 Potencia solar termoeléctrica instalada, acumulada e incremento porcentual (2008-2010).
Comisión Nacional de Energía [21].

A nivel internacional, España es el líder mundial en esta tecnología. Estados Unidos tiene cerca de 500 MW de potencia instalada (la mayor parte desde hace más de veinte años) y está acometiendo la construcción de nuevas centrales, en bastantes de las cuales las empresas españolas son promotoras o constructoras. También se encuentran en operación o construcción diferentes proyectos en Marruecos, Argelia, Egipto, Emiratos Árabes, Italia, Australia, China e India: la capacidad total instalada a nivel mundial actualmente es de alrededor de 2 GW.

Los niveles de penetración de la energía solar termoeléctrica dadas se establecen, por tanto, en 3001 MW y 4800 MW en 2015 y 2020, respectivamente, y una producción de electricidad de 8287 GWh y 14379 GWh en 2015 y 2020, respectivamente.

1.3.10. Impacto ambiental

Según los resultados obtenidos, la energía solar termoeléctrica supuso, en términos de impacto ambiental:

Evitar la emisión de 361 262 toneladas de CO₂ a la atmósfera en 2010, siendo el total acumulado en el periodo 2008-2010 de aproximadamente 426492 toneladas de CO₂. En cuanto al impacto económico, en 2010 se ahorraron unos 5,2 millones de € en derechos de emisión.

De cumplirse los objetivos establecidos en el borrador del PER 2011-2020, la energía producida en centrales termosolares supondrá evitar aproximadamente 3,1 millones de toneladas de CO₂ en 2015 y más de 5,3 millones toneladas de CO₂ en 2020.



1.3.11. Reducción de la dependencia energética

El uso de las energías renovables en la producción de energía eléctrica contribuye de forma muy significativa a reducir las importaciones de combustibles fósiles:

En el año 2010 la producción de energía solar termoeléctrica en España ha evitado importar alrededor de 140692 toneladas equivalentes de petróleo.

Según los precios de los combustibles fósiles, la energía solar termoeléctrica ahorró en 2010 más de 23,9 millones de € en importaciones de combustibles fósiles.

Por su parte, para 2015 y 2020, se prevé que la energía solar termoeléctrica sustituiría la importación de un total de aproximadamente 1,6 y 2,7 millones de tep, respectivamente.



2. ANEXO 2. EFICIENCIA AMTEC

2.1. EFICIENCIA DE CONVERSIÓN TERMOELÉCTRICA DISCO PARABÓLICO/AMTEC

La eficiencia total de conversión del sistema de potencia termosolar es definida como el ratio entre la potencia eléctrica generada por el AMTEC y la energía incidente en el disco solar. Se puede expresar como el producto de las eficiencias del colector y AMTEC:

$$\eta_{overall} = \eta_{AMTEC} \cdot \eta_c$$

La eficiencia térmica del colector solar y la eficiencia de conversión termo-eléctrica del AMTEC son analizadas por separado para obtener la eficiencia total.

Cabe destacar la influencia de la temperatura de trabajo en la eficiencia del sistema disco/AMTEC, puesto que afecta de forma inversa a las eficiencias del colector y del AMTEC. A mayores temperaturas las pérdidas térmicas en el colector serán mayores, mientras que la eficiencia de conversión en el dispositivo AMTEC se ve incrementada. En el apartado “Parámetros influyentes en la eficiencia del sistema disco/AMTEC” queda explicado este hecho, definiendo una temperatura que optimiza el rendimiento del sistema [39].

2.1.1. Eficiencia térmica del colector solar

Es definida como el ratio entre la energía útil entregada y la energía incidente en el disco solar (Figura 13).

$$\eta_c = Q_u/Q_s$$

Considerando que el disco solar tiene un área de apertura A_a y recibe una radiación solar igual a Q_s . El calor neto transferido Q_s es proporcional a A_a y a la irradiación directa normal por unidad de área de apertura del colector I_s , variando ésta con la situación geográfica en la Tierra, la orientación del disco solar, las condiciones meteorológicas y el tiempo del día. Para el siguiente análisis se asume que I_s es constante.

$$Q_s = I_s A_a$$

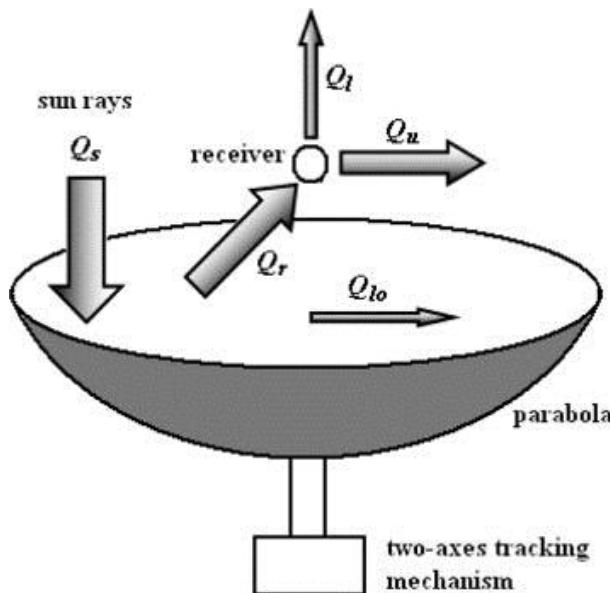


Figura 13 Colector en forma de disco parabólico [39].

En condiciones de estado estacionario, el calor útil entregado por el colector solar es igual al absorbido por el fluido en el receptor. Dicho calor se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_u = Q_r - Q_l$$

donde Q_l la pérdida de calor en el receptor.

La radiación reflejada por el disco parabólico hacia su foco, es función de la eficiencia óptica η_o , que es definida como el ratio entre la energía reflejada por el disco entre la energía incidente [39].

$$\eta_o = Q_r / Q_s$$

La eficiencia del receptor es igual a:

$$\eta_r = Q_u / Q_r$$

Por lo tanto, la eficiencia del colector queda del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{Q_r Q_u}{Q_s Q_r} = \eta_o \eta_r = \eta_o \cdot \frac{Q_r - Q_l}{Q_r} = \eta_o \left(1 - \frac{Q_l}{Q_r}\right) = \eta_o \left(1 - \frac{Q_l}{\eta_o Q_s}\right) \\ &= \eta_o - \frac{Q_l}{Q_s} \end{aligned}$$

La eficiencia óptica

La eficiencia óptica depende de las propiedades ópticas de los materiales empleados, la geometría del colector así como de las imperfecciones que en éste se forman durante su fabricación.

$$\eta_o = \lambda \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot \cos(\theta) \approx 0.83$$

λ : Factor de sombra (coeficiente equivale a la influencia que el receptor hace sobre el disco, generando sombra sobre su superficie útil de colección)

ρ : Reflectancia del disco (cantidad de luz reflejada por el disco)

$\tau\alpha$: Producto de transmitancia y absortancia, hace referencia a la energía que se pierde desde que es reflejada hasta que alcanza el receptor y la que no es absorbida por éste último.

γ : Factor de interceptación del receptor, se define como el ratio de la energía absorbida por el receptor entre la reflejada por el disco.

θ : Ángulo de incidencia, se considera 0, ya que se asume que el eje óptico apunta siempre al sol, de forma que los rayos inciden perpendicularmente a la superficie del disco [39].

Pérdidas de calor en el receptor Q_l

Q_l incluye pérdidas térmicas por conducción en el receptor Q_{lk} , pérdidas térmicas por convección a través de la entrada del receptor Q_{lc} , pérdidas térmicas por radiación a través de la entrada del receptor Q_{lr} .

$$Q_l = Q_{lk} + Q_{lc} + Q_{lr}$$

Las pérdidas térmicas por radiación y por convección son muy superiores a las que se producen por conducción, por ello estas últimas se pueden despreciar. El fenómeno de convección influye en mayor medida, que la radiación, sin embargo es complicado de analizar.

Stine y McDonald modelaron el comportamiento del receptor para calcular las pérdidas por convección y radiación. Con ello se pueden estimar las pérdidas, sin embargo el efecto del viento no es tenido en cuenta [39].

Transferencia de calor por *convección*:

$$h_c = Nu_L k / L$$

$$Nu_L = 0.106 Gr_L^{1/3} (T_w/T_a)^{0.18} (4.256 A_c/A_w)^s h(\varphi)$$

donde

$$Gr_L = gB(T_w - T_a) L^3 / \nu^2$$

$$s = 0.56 - 1.01(A_c/A_w)^{1/2}$$

$$h(\varphi) = 1.1677 - 1.0762 \sin(\varphi^{0.8324})$$

Las pérdidas por convección son:

$$Q_{lc} = h_c A_w (T_w - T_a)$$

Transferencia de calor por *radiación*:

$$Q_{lr} = A_c \varepsilon_{eff} \sigma_{SF} (T_w^4 - T_a^4)$$

donde

$$\varepsilon_{eff} = 1 / \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{A_c}{A_w} \right]$$



$$A_c = A_a/C$$

ε_{eff} : Emitancia infrarroja efectiva de la cavidad.

C : Ratio entre el área de apertura del disco y el área de apertura de entrada del receptor.

2.1.2. Eficiencia de conversión del AMTEC

Las pérdidas que se producen en el AMTEC están relacionadas con fenómenos electroquímicos, eléctricos y térmicos, así como por la degradación de los electrodos y electrolito que influyen de forma determinante en su funcionamiento.

Durante el análisis del AMTEC en laboratorio realizado por M.A.K. Lodhi y Chowdhury en el *Texas Tech University*, la potencia de salida se redujo de 2.48 a 1.27 W después de 18,000 h de trabajo, para una temperatura de 1023 K en el ánodo y de 600 K en el condensador.

En estudios llevados a cabo por *Vijayaraghavan*, se ha demostrado empíricamente que el BASE, es responsable del 50-60% de la caída total de potencia del AMTEC, mientras que los electrodos según M.A.K. Lodhi y Chowdhury se degradan a lo largo de 12,000 h de funcionamiento, causando una disminución de la potencia de salida del 18.75% y del 15.70% a las 18,000 h [28].

Estas elevadas caídas de potencia durante el funcionamiento del AMTEC obligan a realizar un análisis de las partes que componen el dispositivo. Para ello es conveniente definir inicialmente el rendimiento del AMTEC observando de qué parámetros depende.

La eficiencia de conversión del AMTEC es descrita como el ratio entre la potencia eléctrica de salida y el calor total requerido. Obviándose las pérdidas de Joule, el consumo energético de la bomba y las pérdidas parásitas por conducción durante el transporte del fluido de trabajo se obtiene la expresión [39]:

$$\eta_{AMTEC} = \frac{J(V_0 - R_{int}J)}{J \ln(P_a/P_c)/f_B + [c_{pl}(T_B - T_{cd}) + h_{fg}(T_B)]JM/F + q_{rad}}$$

A continuación son descritos los parámetros de los que depende el rendimiento del AMTEC:

Presión ánodo/BASE y cátodo/BASE

P_a es la presión sodio vapor en la interface BASE/ánodo, y es igual a la presión de saturación del vapor a la temperatura del condensador, $P_a = P_{sat}(T_{ev})$.

La presión en la interface cátodo/BASE se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$P_c = P_c^{oc} + \Delta P_{cd}$$

ΔP_{cd} es la pérdida de presión en el cátodo:

$$\Delta P_{cd} = \sqrt{\frac{2\pi R_g T_B}{M}} \left(\frac{3G}{8\pi}\right) \frac{M_s J}{F}$$

R_g es la constante de los gases (8.314 J/mol K), T_B es la temperatura del BASE (que es considerada igual a la temperatura de evaporación del heat pipe ya que se desprecia la disipación de calor entre el acople entre el heat pipe y el BASE [39]), G es el factor geométrico de las pérdidas de presión, M_s es el peso molecular del sodio (23 g/mol), F es la constante de Faraday (96485 C/mol).

El parámetro morfológico del cátodo es adimensional [23]. Está definido por la longitud de poro l , diámetro del poro d , y la densidad en términos de porosidad N .

P_c^{oc} es la presión del sodio vapor en la interface cátodo/BASE en circuito abierto [39].

$$P_c^{oc} = P_{sat}(T_{cd}) \sqrt{\frac{T_B}{T_{cd}}}$$

$P_{sat}(T_{cd})$ es la presión de saturación en el condensador a temperatura T_{cd} .

Fuerza electromotriz

V_0 es la fuerza electromotriz efectiva en el BASE. La expresión de la fuerza electromotriz efectiva V_0 de la celda es:

$$V_0 = V^{oc} - \xi^a + \xi^c$$

donde V^{oc} es el potencial de circuito abierto, dado por la ecuación de Nernst:

$$V^{oc} = \frac{R_g T_B}{F} \ln \left(\frac{P_a^{oc}}{P_c^{oc}} \right) = \frac{1}{f_B} \ln \left(\frac{P_a^{oc}}{P_c^{oc}} \right)$$

P_a^{oc} es la presión sodio vapor en la interface BASE/ánodo en circuito abierto, f_B es igual a $\frac{R_g T_B}{F}$.

Las sobretensiones de polarización (ξ_x) son calculadas a partir de la ecuación de Butler-Volmer, en la que el subíndice “x” se substituye por “a” (ánodo) o “c” (cátodo). Miden la desviación del potencial de cada electrodo respecto a su valor de equilibrio. Su valor se ve incrementado logarítmicamente con la corriente, reduciendo la diferencia de potencial a través del BASE.

$$\begin{aligned} \frac{J_x}{J_x^o} &= \exp(-\alpha f_B \xi_x) - \frac{P_x}{P_x^{oc}} \exp[(1-\alpha)f_B \xi_x] \\ \xi_x &= -\frac{2}{f_B} \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{J_x}{J_x^o} \right)^2 + 4 \frac{P_x}{P_x^{oc}} \right]^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{J_x}{J_x^o} \right\} \end{aligned}$$

$\xi^a > 0$ y $\xi^c < 0$, $J_c = J$ en el cátodo y $J_a = -J$ en el ánodo, J_x^o es la densidad de la corriente de intercambio (mide la naturaleza del contacto en la interface

BASE/electrodo) y está relacionada con la densidad corriente de intercambio de equilibrio en estado de saturación de este modo:

$$J_x^o = J_0^o \left[\frac{P_x^{oc}}{P_{sat}(T_B)} \right]^{1/2}$$

J_0^o depende del tipo de electrodo, de la temperatura de trabajo y presión del fluido en la interfaz electrodo-electrolito. Su expresión es la siguiente:

$$J_0^o = B \frac{P_{sat}(T_B)}{\sqrt{T_B}}$$

B es la corriente de intercambio independiente de la temperatura ($\text{A} \text{K}^{1/2}/\text{Pa m}^2$), con ella medimos la eficiencia de ionización del sodio en la interfaz ánodo/electrolito. P_{sat} es la presión de saturación del sodio vapor a la temperatura del BASE.

Puesto que $P_c < 100 \text{ Pa}$ es varios órdenes de magnitud inferiores a $P_a > 20 \text{ kPa}$, la densidad de la corriente de intercambio es mucho mayor en el ánodo que en el cátodo, por lo que podemos despreciar la sobretensión de polarización el ánodo ξ^a .

Pérdidas por radiación del BASE hacia las paredes del condensador

La resistencia del BASE puede calcularse del siguiente modo:

$$R_B = \rho_B \cdot \delta_B$$

donde δ_B se obtiene a través de la ecuación de Steinbrück:

$$\delta_B = 1.62 \times 10^{-5} \cdot T_B \cdot \exp(-45.5/T_B) + 1.55 \times 10^{-7} \cdot T_B \cdot \exp(3722/T_B)$$

La pérdida por radiación desde el BASE al condensador y las paredes de la celda es la pérdida térmica de mayor importancia en comparación al resto, definida por la siguiente expresión:

$$q_{rad} = \frac{\sigma_{SF}}{Z} (T_B^4 - T_{cd}^4)$$

T_{cd} es la temperatura del condensador y Z es un factor geométrico.

$$Z = \frac{1}{\varepsilon_B} + \frac{1}{\varepsilon_{cd}} - 1$$

ε_B es la emisividad de radiación del BASE, aproximadamente igual a 0.9 a 1100 K y ε_{cd} es la emisividad de radiación del condensador, el cual está provisto de un recubrimiento de sodio líquido.

2.1.3. Parámetros influyentes en la eficiencia del sistema disco/AMTEC

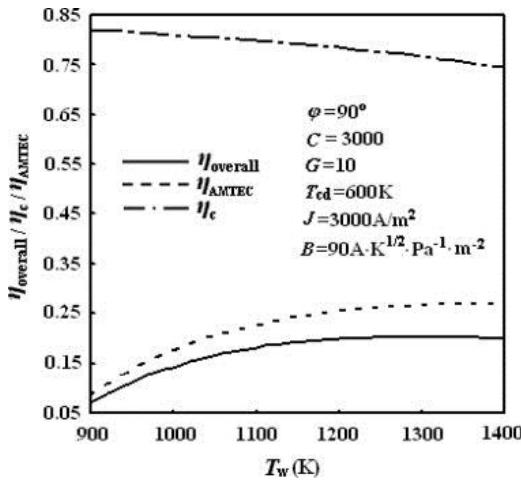
A partir de estas ecuaciones y con unos valores establecidos (Tabla 2.1) de algunos parámetros se simula matemáticamente el comportamiento del rendimiento del conjunto disco/AMTEC [39].

| Principales parámetros del sistema disco/AMTEC | | |
|--|-----------------|----------------------|
| Parametro | Simbolo | Valor |
| Area de apertura del disco parabólico | A_a | 100 m ² |
| Irradiación directa normal por unidad de área del colector | I_s | 900 W/m ² |
| Factor de sombra | λ | 0.99 |
| Reflectividad de la superficie del disco | ρ | 0.94 |
| Producto transmitancia-absortancia | $\tau\alpha$ | 0.9 |
| Fector de interceptación del receptor | γ | 0.99 |
| Relación de aspecto de la cavidad | H/D | 0.25 |
| Emisividad radiactiva de la cavidad | ϵ_c | 0.9 |
| Emisividad radiactiva del BASE | ϵ_B | 0.9 |
| Emisividad radiactiva de la superficie del condensador | ϵ_{cd} | 0.02 |
| Temperatura ambiente | T_a | 298 K |

Tabla 2.1 Principales parámetros del sistema disco/AMTEC [39].

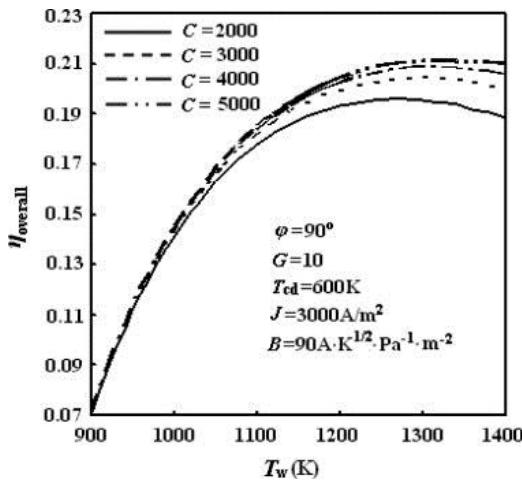
Influencia de T_w

La variación de la temperatura de operación del sistema T_w ($T_w = T_B$) afecta al η_c , η_{AMTEC} y $\eta_{overall}$ como muestra la Figura 14. En el caso del colector solar, a mayor T_w menor es su eficiencia η_c . Por otra parte, el η_{AMTEC} se ve incrementado al incrementar T_w , que es también la temperatura de operación del subsistema AMTEC. Sin embargo para valores relativamente elevados de T_w , el η_{AMTEC} comienza a descender. Estos efectos opuestos sobre el $\eta_{overall}$, determinan un valor óptimo para las condiciones de partida de $\eta_{overall} = 20.6\%$ a $T_w = 1280\text{ K}$. Es conveniente trabajar a temperaturas inferiores aunque ello suponga una pequeña pérdida del rendimiento $T_w = 1200\text{ K}$ $\eta_{overall} = 20.1\%$, con el objetivo de minimizar las exigencias a las que están expuestos los materiales del dispositivo. Además esta penalización en el rendimiento es muy leve, debido a que, como puede apreciarse en la Figura 14, la curva del rendimiento total a partir de 1100 K ve reducida su pendiente en gran medida, aproximándose a una línea recta [39].

Figura 14 Variación de $\eta_{overall}$, η_c y η_{AMTEC} con T_w [39].

Influencia de C

C es el ratio de concentración geométrica, $C = \frac{A_a}{A_c}$, siendo A_a el área de apertura del disco parabólico y A_c el área de entrada del receptor. El siguiente gráfico muestra $\eta_{overall}$ versus T_w , para diferentes C . Obviamente un incremento de C , conlleva un aumento del $\eta_{overall}$. Cuando C va desde 2000 a 5000, el $\eta_{overall}$ aumenta de 19.8% al 21.2%. Sin embargo, el efecto de C es despreciable cuando T_w es relativamente bajo. Inversamente, la influencia de C cobra mayor importancia para T_w elevadas, debido a que las pérdidas de calor parásitas de la apertura del receptor son dominantes para valor de T_w elevados (Figura 15) [39].

Figura 15 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w y C [39].

Influencia de φ

La Figura 16, describe el $\eta_{overall}$ en función de T_w , cuando el ángulo de inclinación de la cavidad oscila entre $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Como es apreciable, la influencia de φ sobre el $\eta_{overall}$ aumenta con el incremento de T_w . Obteniendo el valor máximo del $\eta_{overall}$ cuando $\varphi = 90^\circ$ y el mínimo a $\varphi = 0^\circ$. Esto se debe a que con el aumento de la

inclinación del receptor se obtiene una mayor temperatura del aire estancado en el interior de la cavidad. Las pérdidas por convección son mínimas para $\varphi = 90^\circ$ [39].

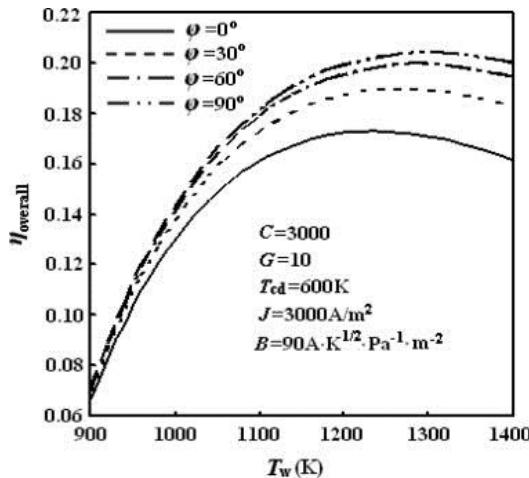


Figura 16 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w φ [39].

Influencia de T_{cd}

La Figura 17 ilustra las variaciones del $\eta_{overall}$ con T_w para diferentes valores de la temperatura del condensador T_{cd} . Todas las curvas de rendimiento tienen una dependencia similar con T_w , existiendo un valor óptimo de T_{cd} que maximiza el rendimiento, en torno a $T_{cd} \approx 600\text{ K}$ [39].

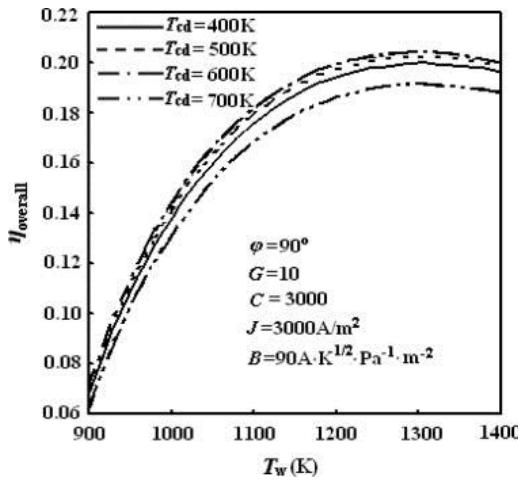
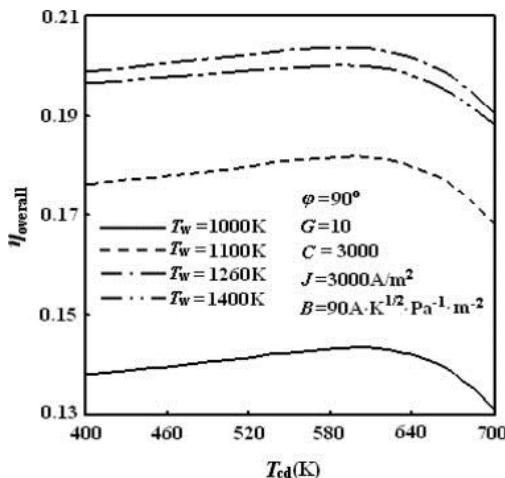


Figura 17 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w T_{cd} [39].

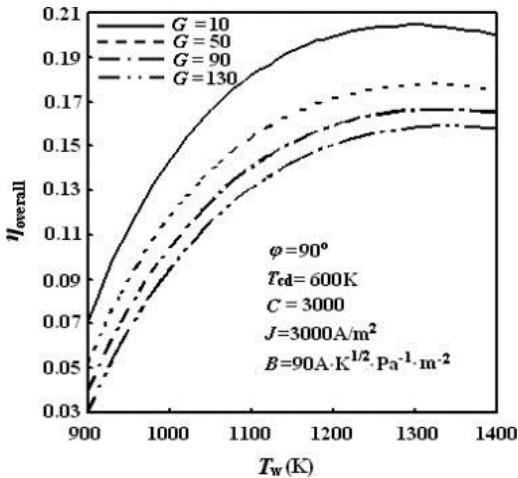
Este punto de inflexión es esperado, porque las pérdidas por radiación del BASE hacia las paredes del condensador disminuyen con el aumento de temperatura en éste último y, al mismo tiempo, este aumento de temperatura es el responsable de una caída de voltaje y de la potencia eléctrica (Figura 18). La caída de potencia se produce gracias a que por encima de los 600 K la presión de saturación del condensador aumenta exponencialmente con T_{cd} , ello implica un aumento de la presión en el interface BASE/cátodo.

El máximo de la curva de rendimiento es muy plano, por lo que, con el propósito de reutilizar el calor del condensador, una relativamente elevada temperatura es preferible.

Figura 18 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w T_{cd} [39].

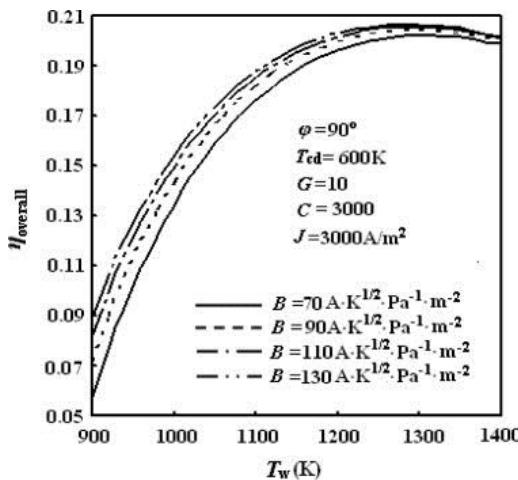
Influencia de G

Un incremento del parámetro morfológico G genera una caída del rendimiento total del sistema disco/AMTEC. $G = \frac{8l}{d^3N}$, está definido por la longitud de poro l , diámetro del poro d , y la densidad en términos de porosidad N . Por lo que un aumento de G se traduce en una disminución de la porosidad del electrodo que conlleva un crecimiento de pérdidas de presión en el cátodo (ΔP_{cd}), que reducen la potencia del sistema (Figura 19) [39].

Figura 19 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w y G [39].

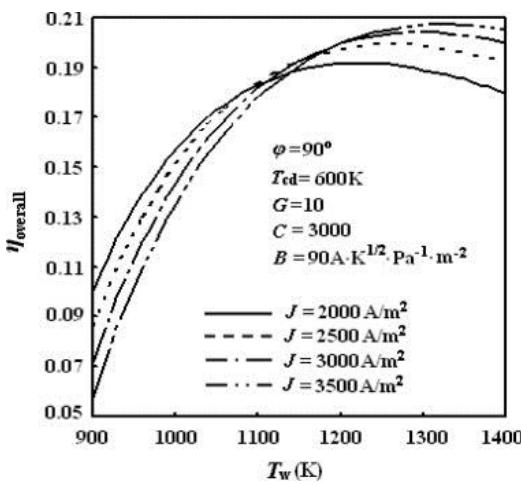
Influencia de B

$\eta_{overall}$ aumenta gradualmente con el incremento del coeficiente de la corriente de intercambio B . Como vimos anteriormente este parámetro mide el contacto entre electrodo y electrolito. Sin embargo la variación de B , no afecta de forma significativa al rendimiento para valores de T_w relativamente elevados (Figura 20) [39].

Figura 20 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w y B [39].

Influencia de J

Variando la densidad de corriente J , se observan dos tendencias. Para los valores de $T_w > 1100\text{ K}$, a mayor densidad de corriente mayor eficiencia. En cambio, para $T_w < 1100\text{ K}$, a menor densidad de corriente mayor eficiencia (Figura 21) [39].

Figura 21 Variación del $\eta_{overall}$ con T_w y J [39].

Para concluir este apartado, la Tabla 2.2 resume los parámetros que afectan al rendimiento del sistema disco/AMTEC.

| Parámetros | Influencia sobre η_{overall} |
|------------|---|
| T_w | (o): η_{overall} aumenta y posteriormente disminuye, por lo que existe un máximo de 20.6% a la temperatura de trabajo $T_w = 1280$ K para las condiciones establecidas. |
| C | (+): η_{overall} aumenta la disminuir C , siendo sus efectos más notables cuando T_w es mayor. |
| φ | (+): η_{overall} aumenta con el incremento de φ , y su efecto es más considerable con el aumento de T_w |
| T_{cd} | (o): η_{overall} inicialmente aumenta, después cae, T_{cd} varía de 400 K a 700 K, obteniendo para $T_{cd} = 600$ K un máximo en el η_{overall} |
| G | (-): η_{overall} disminuye aumentando G ; cuando G es elevado, el η_{overall} continua disminuyendo, pero en menor medida. |
| B | (+): η_{overall} aumenta con el incremento de B , pero el efecto de B es despreciable cuando T_w es relativamente alto. |
| J | (-): Cuando $T_w < 1100$ K, η_{overall} disminuye con el aumento de J (+): Cuando $T_w > 1100$ K, η_{overall} aumenta con el incremento de J |

Nota : (+) significa η_{overall} aumenta en función del parámetro. (-) significa η_{overall} disminuye en función del parámetro. (o) significa η_{overall} alcanza un valor óptimo para ese parámetro.

Tabla 2.2 Resumen de los parámetros que afectan al rendimiento del sistema disco/AMTEC [39].

3. ANEXO 3. PÉRDIDA DE EFICIENCIA AMTEC

3.1. PÉRDIDAS OCASIONADAS DURANTE EL FUNCIONAMIENTO AMTEC

3.1.1. Pérdidas electroquímicas

El factor principal a tener en cuenta para desarrollar un modelo del comportamiento electroquímico del AMTEC es la sobretensión ξ_x , con ello medimos la desviación del potencial de la celda respecto a su valor de equilibrio. Esta desviación se produce por la “fuga de corriente” o conducción de electrones a través del BASE junto con los iones de sodio, que genera una pérdida de presión entre el lado de alta y baja presión. Para la determinación de la corriente asociada a esta sobretensión, se desprecia el efecto de la polarización en el BASE [25]. La expresión de la sobretensión y densidad de la corriente de intercambio son:

$$\xi_x = -\frac{2}{f_B} \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{J_x}{J_x^0} \right)^2 + 4 \frac{P_x}{P_x^{oc}} \right]^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{J_x}{J_x^0} \right\}$$

$$\frac{J_x}{J_x^0} = \exp(-\alpha f_B \xi_x) - \frac{P_x}{P_x^{oc}} \exp[(1-\alpha)f_B \xi_x]$$

En la celda AMTEC, la sobretensión en el ánodo es insignificante en comparación con la del cátodo. La sobretensión en el cátodo se ve influenciada por la corriente de intercambio en la interface electrolito/electrodo y el coeficiente de pérdida de transferencia de masa. Este coeficiente puede traducirse en un parámetro morfológico, G , que mide la resistencia sufrida por los átomos de sodio en el trayecto que comunica la interface electrolito/electrodo con la superficie de salida del cátodo.

También son importantes las pérdidas Óhmicas, estando relacionadas con la resistencia a la conducción en el cátodo y el circuito externo.

Otro foco de pérdidas que afecta a la relación corriente-voltaje son las fugas. Quedan reflejadas a través de:

1. Caídas de presión en el electrolito
2. Pérdida de sodio

Ambos influyen en la eficiencia del proceso, reduciendo la potencia eléctrica generada (Figura 22).

Las pérdidas de sodio son causadas por fallas en la hermeticidad de las juntas (unión BASE-celda) o por la conducción de corriente a través del BASE. La hermeticidad de la celda afecta de forma más significativa a estas pérdidas.

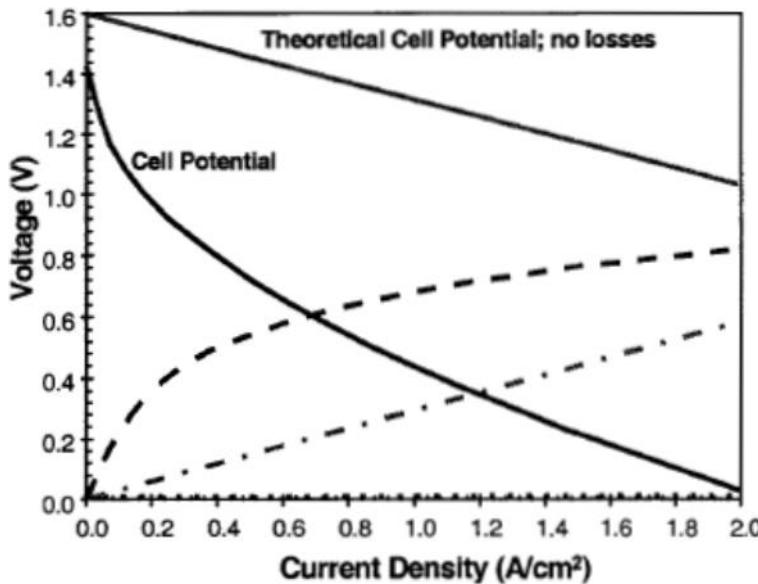


Figura 22 Curva corriente-voltaje, con pérdidas y sin pérdidas [25].

3.1.2. Pérdidas térmicas

Constan principalmente de las pérdidas por radiación y en menor medida por conducción [25].

Las pérdidas por conducción se producen a través de las paredes de la celda, lo que conlleva a un aumento de la temperatura en el condensador. Las pérdidas por conducción se pueden minimizar mediante la utilización de paredes más delgadas.

Las pérdidas por radiación se localizan en diferentes partes de la celda. Para reducirlas se emplean diferentes estrategias:

1. Aumentar el número de tubos en el interior de la celda, consiguiendo que los tubos se irradién entre sí.
2. Empleo de escudos reflectantes de calor, situándolos entre los tubos y el condensador, para dirigir el flujo de calor que va al condensador, orientándolo al BASE.
3. Utilización de condensadores reflectantes.
4. Revestimiento con sodio del condensador (actúa como escudo reflectante).

3.2. DEGRADACIÓN DE LOS ELECTRODOS

3.2.1. Características

Los electrodos deben tener una adecuada porosidad (80-90%), estabilidad bajo altas temperaturas de trabajo durante el periodo de tiempo deseado, elevada conductividad eléctrica que permita a los electrones moverse a través del circuito externo, elevada permeabilidad iónica, ser térmicamente y químicamente compatibles con el BASE y

otros componentes para evitar fenómenos de corrosión. También deben poseer un elevado punto de fusión que les confiera un bajo coeficiente de difusión superficial. Ello requiere un bajo nivel de sinterizado de los granos del electrodo. Es importante que el electrodo no vea alterada su morfología física. Además, es recomendable una alta tolerancia a la expansión térmica del material por estar en contacto con el BASE.

El rendimiento del electrodo depende mayormente del material. La resistencia eléctrica, el coeficiente de expansión térmico, la presión del vapor y el coeficiente de auto-difusión superficial son los parámetros a tener en cuenta para la elección del material. La resistencia eléctrica y la superficie de auto-difusión deberían ser bajas para un electrodo ideal. También el coeficiente de expansión térmica del electrodo debería ser muy similar al del material del BASE [27].

3.2.2. Degradación del cátodo

La sobretensión en el ánodo es despreciable en comparación con la del cátodo y las pérdidas óhmicas en la celda. En consecuencia, los estudios de degradación del electrodo se han centrado en el cátodo.

A partir de estudios empíricos se ha constatado que hay dos parámetros que caracterizan el rendimiento de operación de los electrodos [25]:

1. La corriente de intercambio
2. El factor morfológico

La *corriente de intercambio* proporciona información acerca de la eficiencia con la que los iones de sodio y los electrones interactúan en la interface electrodo-electrolito. La reacción que se produce en la interface es:



Se produce un intercambio de corriente tanto en el ánodo como en el cátodo, pero es éste último el que determina el rendimiento de la celda.

La corriente de intercambio es una función de la resistencia a la transferencia de carga a través de la interface, y su magnitud está relacionada con el tamaño del área donde se produce la reacción. El electrodo, se puede considerar en un modelo simplificado, como una deposición superficial de sus granos sobre el electrolito, cuya única función es la conducción de electricidad. La reacción de electrólisis del sodio, solo se produce en el perímetro de los granos del electrodo, por lo que cuanto menor sea el número de granos (o, dicho de otro modo, menor sea el tamaño de éstos) el área de reacción será mayor.

De esta forma, la corriente de intercambio está ligada al crecimiento de grano.

El AMTEC trabaja en un rango elevado de temperatura (500-1200 K) que produce el sinterizado de los granos del electrodo, favoreciendo su unión. Por lo tanto, la reducción del número de granos origina un menor contacto entre electrodo y electrolito. El volumen de grano aumenta al producirse la unión con otros granos, lo que conlleva a un aumento de la porosidad del electrodo.

Las consecuencias que derivan de este hecho afectan de manera adversa a la potencia:

1. Al aumentar la porosidad, el transporte de masa de vapor de sodio aumenta, conduciendo a un aumento de potencia.
2. Disminuye la conductividad eléctrica (menor área de reacción electrolítica).

Con el paso del tiempo ésta última tiene un efecto más pronunciado.

El *factor morfológico* mide la resistencia en el electrodo que sufren los iones de sodio a ser apartados de la interface después de la oxidación.

En los electrodos en los que el transporte de los átomos de sodio se logra únicamente por el flujo de masa, el factor morfológico está relacionado con el tamaño y la cantidad de poros en el electrodo los cuales permiten el paso del sodio. Sin embargo, en la mayoría de los materiales usados en los electrodos, el sodio difunde a través de los bordes de grano. También existen electrodos que poseen cierta conductividad iónica para transportar los iones de sodio de la interface antes de ser reducidos en el cátodo.

En resumen, cuando los electrodos trabajan con sodio a altas temperaturas y presiones, tiende a sinterizar, afectando a la porosidad, resistencia, naturaleza de los granos y al contacto BASE/electrolito. La formación de poros en los electrodos, permite al sodio fluir a través de ellos más fácilmente, por otra parte, a lo largo del tiempo, el número de poros crecerá, reduciendo el contacto entre granos, reduciendo así su conductividad eléctrica. Dicho de otro modo, la corriente de intercambio disminuye al producirse el crecimiento de grano por difusión atómica, a su vez el perímetro total de los granos disminuye, reduciendo el tamaño de la zona de reacción. Con el crecimiento de grano se producen poros en el electrodo debido a la unión de los granos, mejorando el transporte másico del sodio y perjudicando el contacto electrodo/electrolito. El factor morfológico no mejora siempre con el tiempo, especialmente en los electrodos donde el transporte de sodio no se lleva a cabo por procesos de flujo másico.

Vista la importante influencia del crecimiento de grano en el funcionamiento de las células AMTEC, se va a desarrollar en el siguiente apartado un modelo que describe el comportamiento de este fenómeno.

3.2.3. Modelo de movilidad de las fronteras de grano

El crecimiento de grano del electrodo se debe principalmente a la difusión de material entre dos granos adyacentes. La superficie de contacto entre los granos se reduce conforme éstos aumentan su tamaño. Los granos continúan uniéndose hasta que la energía superficial relacionada con la tensión entre los granos alcanza el equilibrio. Ésta condición surge cuando los granos no pueden crecer más debido a que los granos colindantes lo impiden, por lo que su estado energético tensional solo puede liberarse al unirse con otros granos [27].

A continuación se describe un modelo de crecimiento de grano en los electrodos.



Inicialmente el grano experimenta una fuerza motriz en el borde de grano debida a las elevadas temperaturas y presiones:

$$V = M\Delta P$$

Donde M es la movilidad y ΔP es la diferencia de presión.

La diferencia de presión puede aproximarse con el radio medio de grano R (asumiendo que los granos tienen forma esférica) y la energía media de borde de grano γ_b (tensión superficial).

$$2\pi R\gamma_b = \pi R^2 \Delta P$$

Velocidad del borde de grano es:

$$V = \frac{dR}{dt} = M\Delta P = \frac{2M\gamma_b}{R}$$

$$R^2 - R_o^2 = 4M\gamma_b t$$

Donde R_o es el radio inicial. Esta variación cuadrática del radio durante el crecimiento del grano ha sido derivada bajo condiciones ideales.

Sin embargo, la diferencia de presión en el borde de grano tiene una dependencia más compleja sobre las energías superficiales y volúmicas, resultando una mayor dependencia de R , variando de material a material de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R^n - R_o^n = cM\gamma_b t$$

Donde “n” es el exponente de crecimiento de grano que va a ser evaluado y “c” es una constante de proporcionalidad para obtener las dimensiones correctas. “n” se obtiene experimentalmente para diferentes materiales y diferentes condiciones físicas del electrodo.

El factor de movilidad M , obedece la relación de Arrhenius, ya que la movilidad de las fronteras de grano aumenta con la temperatura, para una energía de activación específica E_A . A elevadas temperaturas la probabilidad de que dos granos adyacentes se unan es mayor. La energía de activación es la cantidad de energía requerida para asegurar que dicha reacción sucede. El factor de movilidad es definido como:

$$M = M_o \exp\left(-\frac{E_A}{R_g T}\right)$$

Donde M_o es la constante de movilidad, T es la temperatura del ánodo y R_g es la constante del gas. Relacionando las dos ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$R^n - R_o^n = tcM_o \exp\left(-\frac{E_A}{R_g T}\right) \gamma_b$$

Donde γ_b es definida como la mínima cantidad de energía necesaria para unir dos granos o dividirlos (Figura 23). La tensión superficial y la presión producen un ángulo ϕ entre las fronteras individuales de cada grano.

$$\gamma_b = 2\gamma_s \cos\phi$$

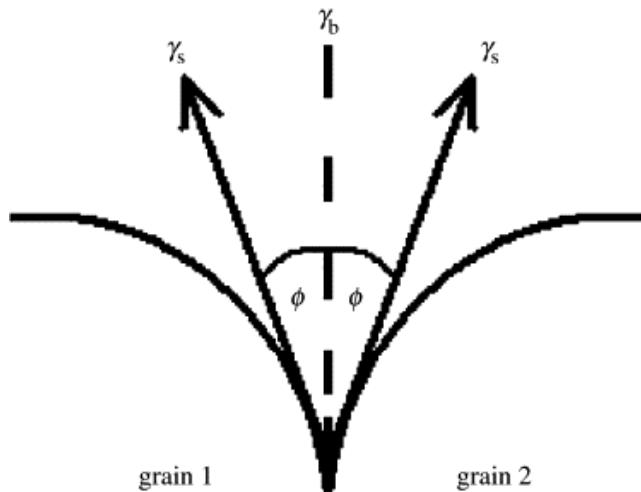


Figura 23 Energía del borde de grano que surge del contacto de dos granos [27].

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores, se obtiene esta ecuación que describe la dependencia del crecimiento de grano con el tiempo y la temperatura:

$$R_f = R_o \left[1 + \frac{(2cM_o\gamma_s \cos\phi)t \exp\left(-\frac{E_A}{R_g T}\right)}{R_o^n} \right]^{1/n}$$

Definimos el parámetro de movilidad “a” para agrupar y simplificar términos de la expresión:

$$a = 2cM_o\gamma_s \cos\phi$$

$$R_f = R_o \left[\frac{1 + at \exp\left(-\frac{E_A}{R_g T}\right)}{R_o^n} \right]^{1/n}$$

Finalmente esta expresión describe el modelo de crecimiento de los bordes de grano. Por lo que se va analizar cómo influyen cada uno de sus parámetros. La modificación del parámetro “a” altera el comportamiento del crecimiento de grano. Esta expresión demuestra que si “a” aumenta R_f también aumenta. Los términos que componen “a” (c , M_o , γ_s , $\cos\phi$) son difíciles de medir en un laboratorio. Sin embargo, la variación de M_o y γ_s con la temperatura es ínfima en comparación con E_A , por lo que se asumen constantes. El ángulo ϕ entre granos, varía muy poco con el tiempo, por que

también se asume constante. El parámetro “ n ” cuyo rango de valores (de 3 a 6.5, para diferentes materiales) ha sido acotado experimentalmente. Si el fenómeno de crecimiento de grano está regulado en mayor medida por difusión volúmica, en lugar de difusión superficial su valor será más próximo a 3, en el caso contrario, cuando el proceso lo gobierna la difusión superficial su valor será más próximo a 4. Cuando “ n ” aumenta, el tamaño de grano disminuye, por lo tanto valores elevados de “ n ” evitan una degradación rápida de los electrodos. El aumento de la temperatura “ T ” en el lado del evaporador del AMTEC redundará en un aumento del tamaño de grano. La energía de activación es la energía que necesitan los bordes de grano para comenzar a expandirse dentro del material. Por lo tanto, a mayor energía de activación menor será el crecimiento que experimentará el grano, ya que la barrera energética a superar para comenzar la expansión es mayor. En conclusión, los parámetros que favorecen un menor crecimiento de grano, o lo que es lo mismo, una menor degradación durante el tiempo de operación de los electrodos son:

Parámetros que permiten una mejora en la conservación de los electrodos: $\downarrow R_f$

$\uparrow a$ ($\uparrow M_o$, γ_s , \emptyset), $\downarrow T$, $\uparrow E_A$, $\uparrow n$

La representación gráfica del tamaño de grano con el tiempo aparece representada en la siguiente figura:

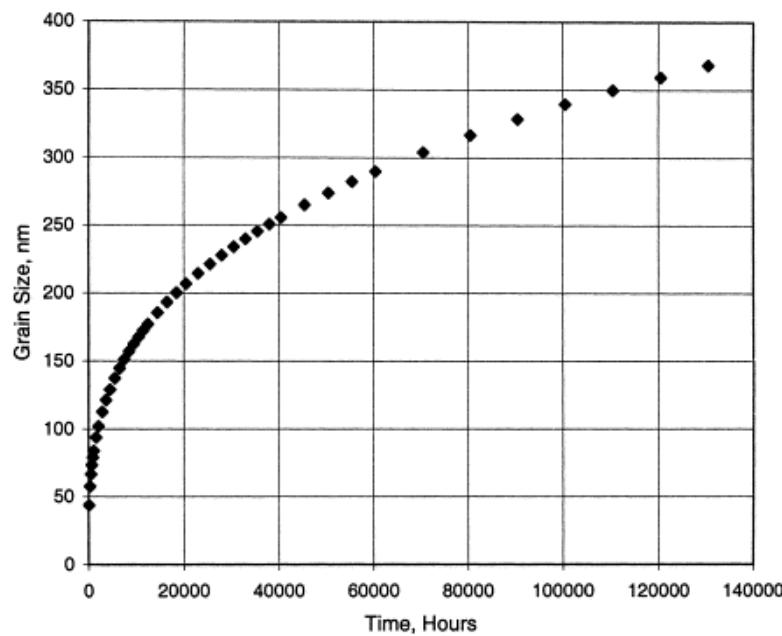


Figura 24 Variación del tamaño de grano en un electrodo de TiN [28].

Los datos con los que se ha construido esta gráfica, así como la evolución del comportamiento de tamaño de grano, corriente de intercambio y potencia de salida transcurridos 15 años, están reflejados en la Tabla 3.1

| | Tamaño de grano (nm) | Corriente de intercambio (A K ^{0.5} /Pa m ²) | Potencia de salida (W) |
|-----------------------|----------------------|---|------------------------|
| Valor inicial | 30 | 270 | 2.48 |
| Valor final (15 años) | 368.38 | 150 | 2.21 |
| Cambios | 338.38 | 120 | 0.27 |
| Cambios (%) | 1127.9 | 44.44 | 10.88 |

Tabla 3.1 Crecimiento de grano en un electrodo de TiN, datos y resultados [28].

El valor de a es 1.141×10^{12} , el valor de E_A , T , R , R_0 y n , son 175.5 kJ/mol , 1023 K , 8.314 J/mol , 30 nm y 3.2 .

3.2.4. Relación entre tamaño de grano, corriente de intercambio y potencia generada

Con el objetivo de conocer la relación entre el crecimiento de grano de los electrodos y la potencia producida, el *Laboratorio de Propulsión Jet, Pasadena, CA (JPL)* ha realizado estudios experimentales y modelos teóricos, a cerca de las variaciones de tamaño de grano de varios materiales [27][28][31]. Con ello ha creado una relación empírica entre el tamaño de grano del material del electrodo y la corriente de intercambio, dada por:

$$B = B_o - bR_f^{1/2}$$

donde B es la corriente de intercambio independiente de la temperatura y B_o es la corriente de intercambio inicial (asumiendo $270\text{ A K}^{1/2}\text{ m}^2\text{ Pa}$) y b es el coeficiente de la corriente de intercambio del electrodo perteneciente al material empleado (en este caso, TiN) determinado experimentalmente, es igual a 6.218.

En electrodos de nitruro de titanio (TiN) la relación hallada por Lodhi y Chowdhury entre potencia de salida y corriente de intercambio es:

$$P_e = 1.5135 + 0.006 \times B - B^2 \times 10^{-5}$$

Comparando los resultados empíricos y experimentales se puede observar una tendencia desigual entre ambas, ello se debe, a que en el modelo teórico solo se tienen en cuenta como factores degradantes de la potencia, el crecimiento de grano y la auto-difusión superficial en los electrodos. Sin embargo, en la realidad, hay diversos factores que afectan negativamente a la generación de potencia: degradación del electrodo, electrolito, condensador, evaporador, paredes de la celda, pérdidas térmicas, pérdidas eléctricas. Por lo que comparando las dos curvas obtenidas, es posible visualizar y

cuantificar el grado de responsabilidad del electrodo en la pérdida de potencia de salida en una célula AMTEC, situándose éste valor en torno al 17% de las pérdidas totales.

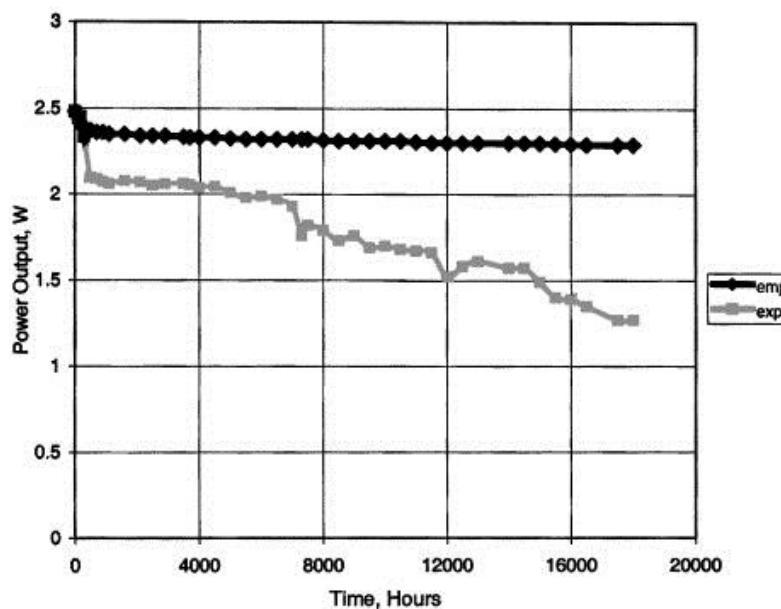


Figura 25 Comportamiento experimental y teórico de la potencia producida respecto al tiempo para electrodos de TiN, .[28]

A partir de los resultados empíricos, se ha generado una relación matemática entre P_e y B , dada por:

$$P_e = 1.95 \left(1 - e^{-B^2/850}\right) + 0.00178B$$

La comparación de la simulación realizada por Lodhi y Chowdhury con los resultados obtenidos puede verse en la Figura 26.

La diferencia de aplicación entre el método empírico y el teórico es que éste último solo puede aplicarse para $B > 120$, pero para valores superiores corresponde con los resultados prácticos, siendo su rango de aplicación de 120 a 280.

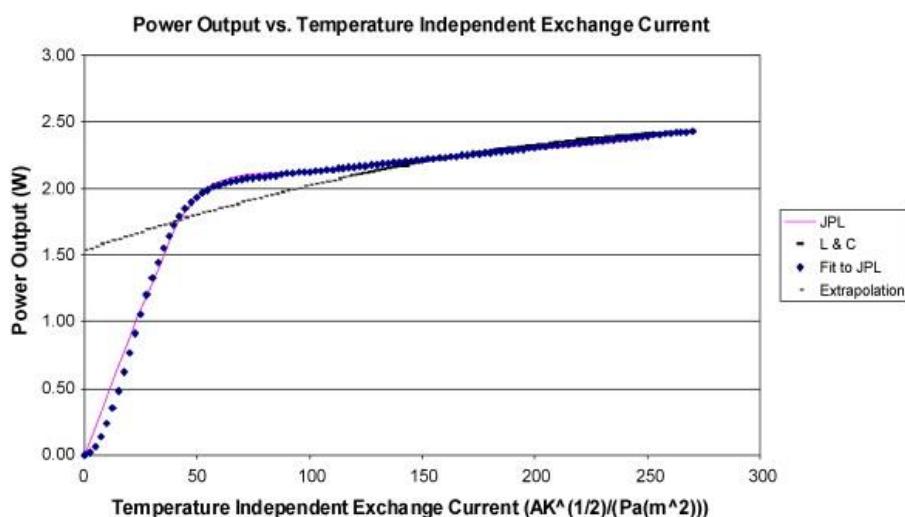


Figura 26 Potencia vs corriente de intercambio (B), modelo teórico (L&C) y experimental (JPL) [27].

De este modo queda probada la utilización del modelo teórico y por lo tanto se puede calcular el valor óptimo del grano que minimiza las pérdidas de potencia en los electrodos.

Sustituyendo las ecuaciones anteriores:

$$P_e = 1.5135 + 0.006 \times B - B^2 \times 10^{-5}$$

$$B = B_o - bR_f^{1/2}$$

$$P_e = 1.5135 + 0.006 \times (B_o - bR_f^{1/2}) - (B_o - bR_f^{1/2})^2 \times 10^{-5}$$

Derivando $\frac{P_e}{\delta R_f}$ obtenemos el valor óptimo de tamaño de grano [27]:

$$R_f = \left(\frac{B_o - 300}{b} \right)^2$$

Esta ecuación permite calcular el valor de R_f para una B_o dada. El valor inicial del tamaño de grano R_o corresponde a un valor específico de B_o , para el cual la potencia sería maximizada. La potencia de salida es máxima en las células AMTEC cuando B_o es $270 A K^{1/2} m^2 Pa$. Este valor corresponde a un tamaño de grano, R_f igual a 23 nm (Tabla 3.2). Tamaños inferiores del grano mejorarían la potencia obtenida, pero no es posible obtener físicamente granos de esas características.

| Corriente de intercambio inicial, B_o ($A K^{1/2} m^2 Pa$) | Tamaño de grano (nm) |
|--|----------------------|
| 50 | 1617 |
| 70 | 1368 |
| 90 | 1141 |
| 80 | 1252 |
| 110 | 934 |
| 130 | 747 |
| 150 | 582 |
| 170 | 437 |
| 190 | 313 |
| 210 | 209 |
| 230 | 127 |
| 250 | 65 |
| 266 | 30 |
| 270 | 23 |
| 280 | 10 |
| 286 | 5 |
| 290 | 3 |

Tabla 3.2 Tamaño de grano optimizado correspondientes a cada valor la corriente de intercambio independiente de la temperatura inicial [27].

3.3. ELECTROLITO SÓLIDO

El BASE, o electrolito sólido, es el principal causante en la degradación de la potencia. Contribuye de forma individual con un 50-60% de las pérdidas totales de potencia. Por ello es de especial importancia conocer su funcionamiento y las características del material que lo conforma (β -alúmina).

El β -alúmina pertenece a la familia de las cerámicas, de entre sus propiedades destaca la conducción iónica. En base a ella se desarrolla su aplicación en el AMTEC como electrolito sólido.

A diferencia de otros electrolitos, el β'' -alúmina es un pobre conductor de electrones, sin embargo es un excelente conductor de iones. Esta insólita propiedad de conducción en el β'' -alúmina, se debe a su estructura cristalina.

Cualquier cambio en su estructura afecta de forma directa a su resistencia iónica y por ende a la potencia producida.

3.3.1. Estructura

El BASE es pieza clave en el funcionamiento de AMTEC. Los materiales empleados en su fabricación son los β -alúminas que pertenecen a la familia de los aluminatos no estequiométricos. De entre ellos el β'' -alúmina $\text{Na}_2\text{O} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$ (Figura 30) es el más comúnmente utilizado. Poseen una estructura laminar, en la que cada capa tiene un grosor de 1 nm que comprende bloques compactos de iones O^{2-} en los que los iones Al^{3+} ocupan los intersticios octaédricos y tetraédricos en la misma disposición que el Mg^{2+} y el Al^{3+} en la estructura de espinela (Figura 27). Los bloques de espinela están separados por planos de simetría cuyas capas tienen un menor grado de compacidad, que contienen Na^+ y O^{2-} . Los Na^+ pueden desplazarse libremente en este plano, con la limitación de movimientos en la dirección perpendicular (anisotropía, Figura 28, Figura 30) [3]. A pesar de la estructura anisotrópica, se obtienen elevados niveles de conducción iónica.

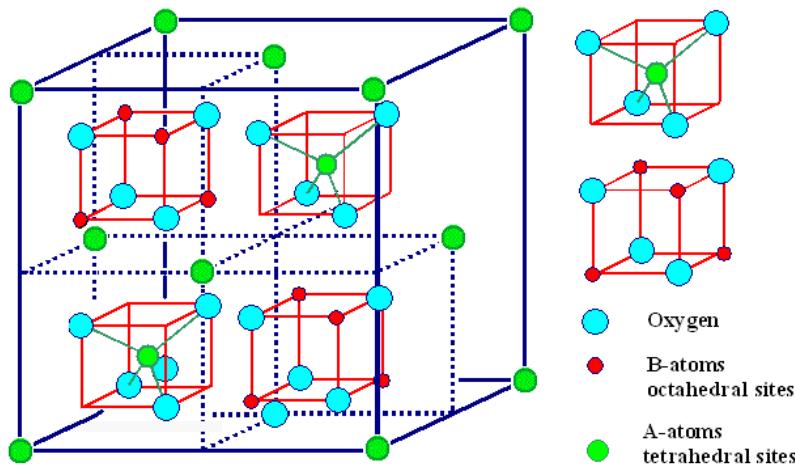
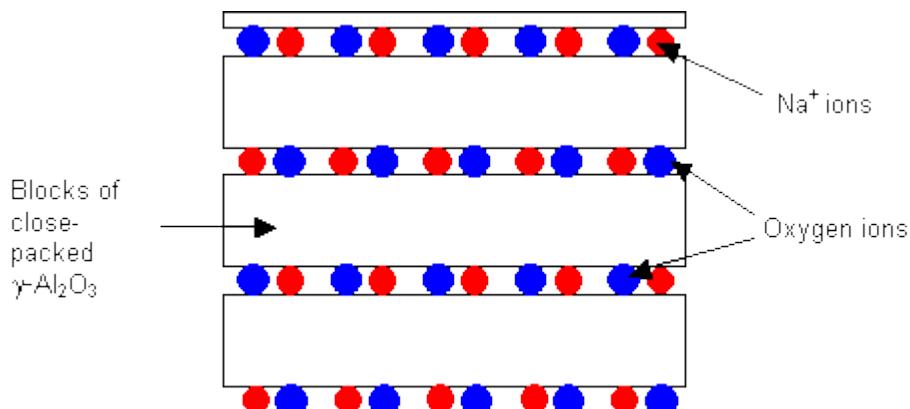
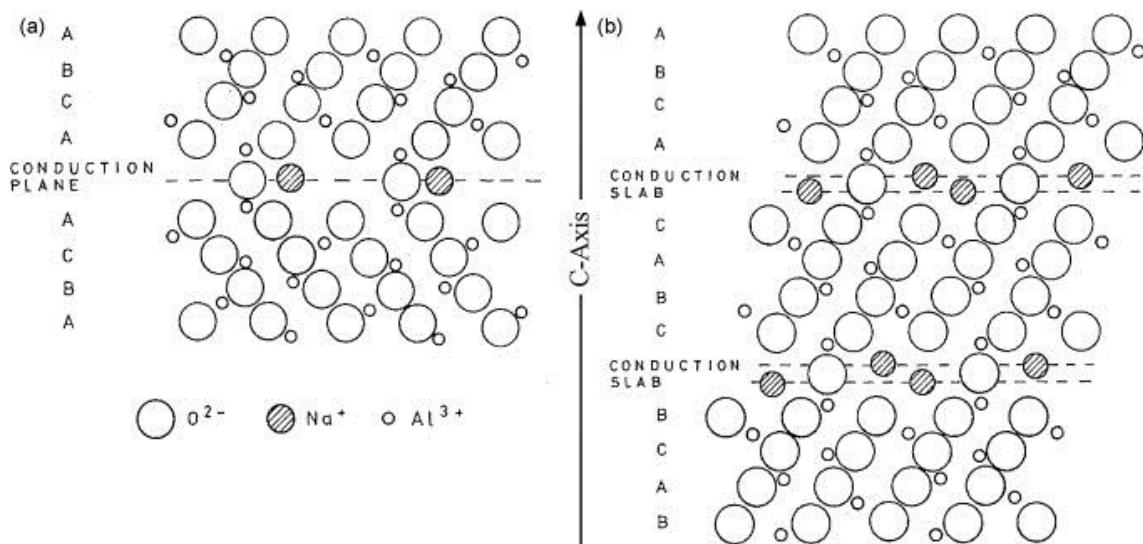


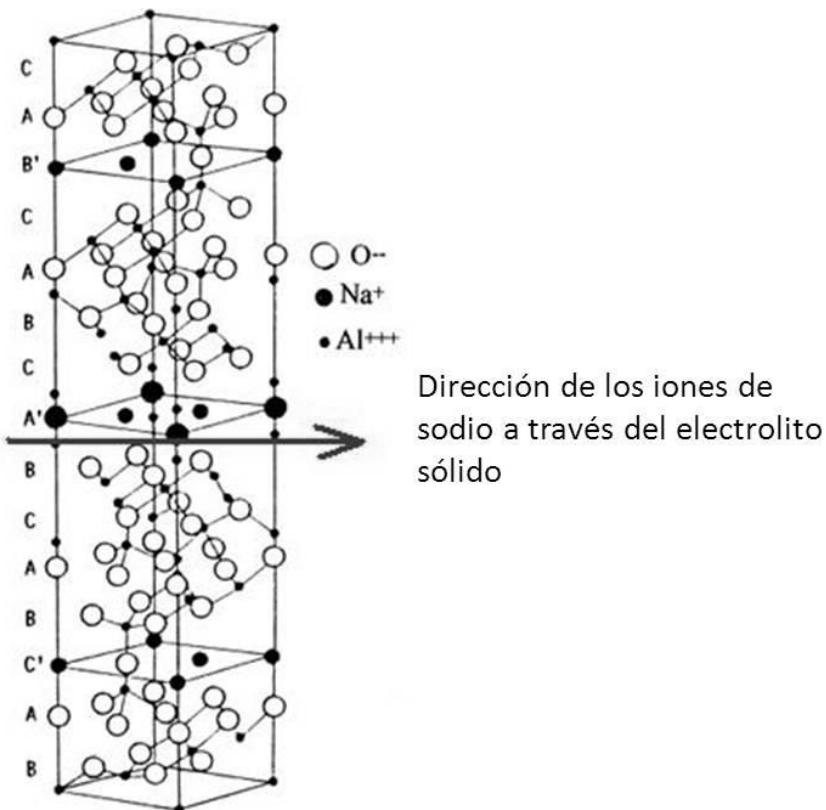
Figura 27 Estructura de Espinela [19].

Figura 28 Estructura de la β'' -alúmina [10].

Hay dos estructuras cristalográficas diferentes en este grupo: β -alúmina (hexagonal, $a_0=0.559$ nm, $c_0=2.261$ nm) y β'' -alúmina (romboédrica, $a_0=0.560$ nm, $c_0=3.395$ nm). En la β -alúmina el plano de conducción se encuentra entre dos bloques de espinela, mientras que en la β'' -alúmina por cada dos planos de conducción hay tres bloques de espinela (Figura 29) [40].

Figura 29 Proyección de celdas unitarias en (1 1 2 0) (izda.) β -alúmina y (dcha) β'' -alúmina [40].

Debido a la forma en que se establecen los iones de oxígeno, la celda unitaria de β'' -alúmina es un 50% mayor que la de β -alúmina. La β'' -alúmina posee una mayor conductividad iónica.

Figura 30 Estructura de la β'' -alúmina [7].

3.3.2. Defectos puntuales

La conducción de los iones se produce a través de las vacantes o intersticios que hay en la red cristalina. Los defectos puntuales se producen por la ausencia de átomos de sus posiciones iniciales (vacantes) o por la ocupación de intersticios entre dos posiciones normales.

En los cristales iónicos, cuando dos iones de carga opuesta se pierden en el cristal iónico, se crean un par de huecos debidos al catión y al anión, lo cual es conocido como imperfección de Schottky. Si un catión se mueve hacia una posición intersticial en un cristal iónico, a su vez crea una vacante en la posición inicial donde se situaba. Esta dualidad vacante defecto intersticial se llama imperfección de Frenkel. Las impurezas atómicas de tipo sustitucional se consideran también defectos puntuales.

Las concentraciones de equilibrio de los defectos puntuales pueden derivarse en base a la mecánica estadística. Para un óxido binario (no es el caso del β'' -alúmina, $\text{Na}_2\text{O} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$) dichas concentraciones pueden obtenerse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$n_S \approx N \exp\left(-\frac{\Delta H_S}{2kT}\right)$$

$$n_F \approx (N N')^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta H_F}{2kT}\right)$$

donde n_S y n_F son las concentraciones de los defectos de Schottky y de Frenkel, ΔH_S y ΔH_F son las entalpias de transformación que acompañan la formación de defectos asociados, N es la concentración de aniones o cationes y N' es la concentración de intersticios disponibles [1].

3.3.3. Conductividad iónica

La conducción de los iones depende de la presencia de vacantes, a través de los cuales los iones se mueven. En ausencia de un campo eléctrico, las vibraciones térmicas (proporcionales a kT) causan el intercambio de posiciones de los iones en las vacantes. La ecuación de Nernst-Einstein relaciona el proceso de auto-difusión con la corriente de iones σ_i (conductividad) generada por un campo eléctrico:

$$\frac{\sigma_i}{D_i} = \frac{N_i Q_i}{kT}$$

D_i es el coeficiente de auto-difusión de iones “ i ”, Q_i es la carga que transporta y N_i es su concentración. Por lo tanto, la conducción iónica se ve favorecida por:

1. Carga pequeña
2. Tamaño pequeño
3. Geometría de la malla

Los cationes no se enfrentan a elevadas barreras energéticas, sin embargo, normalmente para desplazarse a una vacante vecina, tiene que pasar por un espacio pequeño entre tres O²⁻. Por lo tanto, un menor tamaño de éstos facilitara su difusión en la red.

En ausencia de campo eléctrico, los cationes migran aleatoriamente, y su movilidad depende de la temperatura, ya que ésta determina la facilidad con la que los Na⁺ superan la barrera energética del salto. En consecuencia, la dirección y sentido de su movimiento tienen la misma probabilidad para cada una de las vacantes vecinas. Sin embargo, si introducimos un campo eléctrico, podemos orientar el movimiento de los cationes, debido a que la energía aportada por el campo reduce la barrera energética de salto en la dirección en que éste es aplicado.

La probabilidad de salto de los cationes es:

$$j = \frac{n_v A}{N T} E \exp\left(-\frac{\varepsilon_j}{kT}\right)$$

donde n_v/N es la fracción de lugares de Na⁺ que son vacantes, A es una constante que describe el estado de vibración del cristal y ε_j es la energía de activación que necesita el ion para moverse de una posición a otra. Asumimos que las vacantes forman parte de los defectos de Schottky, por lo que $n_v = n_S$:

$$j = \frac{A}{T} E \exp\left(-\frac{\Delta H_S}{2kT}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_j}{kT}\right) = \sigma E$$

$$\sigma = \frac{A}{T} \exp\left\{-\frac{1}{kT}\left(\varepsilon_j + \frac{\Delta H_S}{2}\right)\right\}$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{kT}\right)$$

siendo $\varepsilon_i = \varepsilon_j + \Delta H_S/2$ la energía de activación.

El alojamiento de un exceso de cationes de sodio en los intersticios podría mejorar significativamente la conductividad. En presencia de este exceso de iones de sodio, la compensación eléctrica dentro de la red se puede lograr de dos modos. El primero de ellos es el mecanismo de los defectos de Frenkel, dentro del cual un ion de oxígeno intersticial situado en uno de sus tres lugares intermedios equivalentes, en el plano de conducción, es remplazado por un catión de aluminio, dejando éste una vacante en la red octaédrica donde se encontraba. La presencia del anión de oxígeno intersticial permite alojar dos iones de sodio extra en el plano de conducción. El segundo mecanismo es la sustitución de iones de aluminio en los bloques de espinela por iones monovalentes o divalentes.

La adición de impurezas de forma externa a la red genera vacantes, que al mismo tiempo mejoran la conductividad iónica [1].

3.3.4. Tipos de degradación

El BASE está sujeto a esta elevada temperatura (superiores a 1000 K) en un ambiente de sodio vapor, el cual es altamente reactivo y corrosivo a dichas temperaturas, durante una exposición temporal elevada. El BASE experimenta dos afecciones que reducen su rendimiento: Degradación térmica y contaminación química, Figura 31[30].

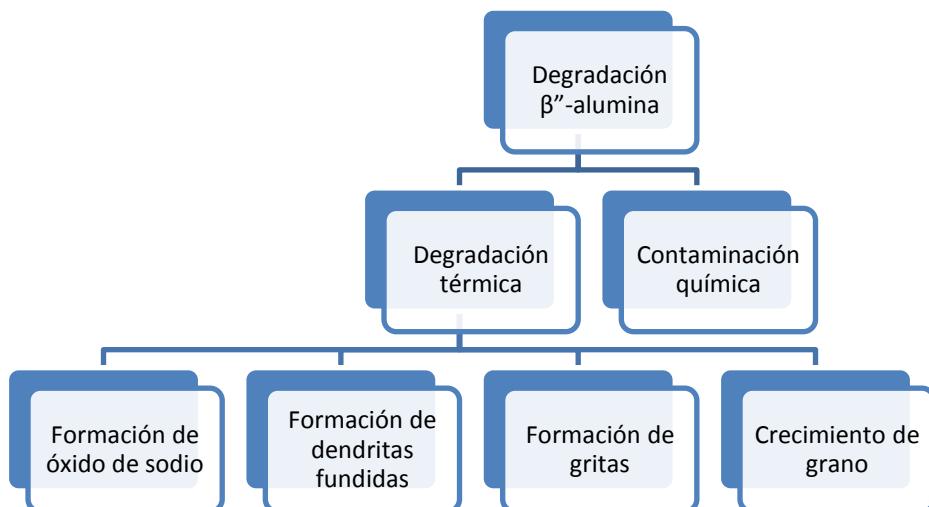


Figura 31 Tipos de degradación del electrolito sólido.

Degradación térmica

La degradación térmica se produce en torno a las 1000h de funcionamiento, materializándose de las siguientes maneras:

Formación de óxido de sodio

Los iones de sodio presentes en las estructura (plano de conducción) del β'' -alúmina son responsables de la conducción iónica. Por lo tanto la pérdida de estos iones al reaccionar con elementos dopantes del BASE, como por ejemplo el MgO, conlleva una reducción en la conductividad iónica.

Formación de dendritas fundidas

Las dendritas son columnas de material que se encuentran en diferente fase, composición o microestructura que el resto. En este caso, las dendritas son de sodio fundido. La causa de su formación son las altas temperaturas y el flujo de carga. Una vez formadas, comienzan a aumentar de tamaño y a propagarse a través de la estructura, pudiendo causar en última instancia un cortocircuito entre ánodo y cátodo que transportaría los electrones directamente entre éstos, con la consiguiente reducción del flujo de electricidad en la carga externa.

Formación de grietas

Una grieta es un poro o una discontinuidad en el material que tiene la propensión de propagarse o incrementar su tamaño causando finalmente la ruptura del material. El proceso se describe a continuación. Las micro grietas superficiales en la β'' -alúmina se llenan de sodio. Cuando la celda comienza a generar potencia, el sodio sale de las grietas debido a la elevada presión, quedando éstas al descubierto. De este modo la migración del sodio conlleva un deterioro intergranular y finalmente la fractura.

Si las grietas se propagan por los tubos del BASE radialmente, se crea un canal de unión entre las regiones de alta y la de baja presión. Ello causará el transporte directo de los átomos de sodio entre ambas zonas debido a la diferencia de presión, reduciendo el flujo de corriente a la carga externa.

Crecimiento de grano

Las elevadas temperaturas aplicadas durante un largo periodo de tiempo causan el crecimiento de grano del material. El crecimiento de grano afecta a la conductividad iónica de forma adversa. Al producirse el crecimiento de grano, la densidad de los granos disminuye así como el contacto BASE/electrodo, ello queda reflejado en una disminución de la corriente de intercambio. La reducción de la corriente de intercambio se traduce en una disminución del número de electrones liberados en la ionización.

Por otra parte, el crecimiento de grano reduce el número de granos o, dicho de otro modo el número de bordes de grano, reduciendo la resistencia a la circulación de los iones.

Otro efecto negativo, es el aumento de porosidad, que aumenta la resistencia iónica del material, siendo este último el fenómeno predominante sobre los anteriores. Por ello,

un aumento del tamaño de grano acarrea un aumento de la resistencia al paso de los iones a través del electrolito.

Contaminación química

Las paredes de la celda, así como numerosos componentes de la celda, están hechas de acero inoxidable. El vapor de sodio a elevada presión y temperatura reacciona con elementos como el cromo y el manganeso procedentes del acero inoxidable. Los productos de estas reacciones se depositan en la superficie del BASE o se introducen en él. Las consecuencias de esta deposición son el bloqueo de los poros en el BASE y la obstrucción del flujo de sodio.

Cuando los productos se adentran en el interior del BASE, se pueden depositar en los bordes de grano y así incrementar su resistencia.

En el caso en el que substituyan a los iones de sodio de la estructura cristalina, pueden disminuir su conductividad, en el caso de los radios atómicos de las impurezas sean superiores a los del sodio [30].

3.3.5. Modelado del rendimiento del BASE

El efecto de todas las problemáticas anteriormente comentadas, se pueden englobar en un incremento de la resistencia iónica.

Se han llevado a cabo ensayos (Figura 32) que arrojan los siguientes resultados en términos de variación de resistencia iónica respecto al tiempo [30][29].

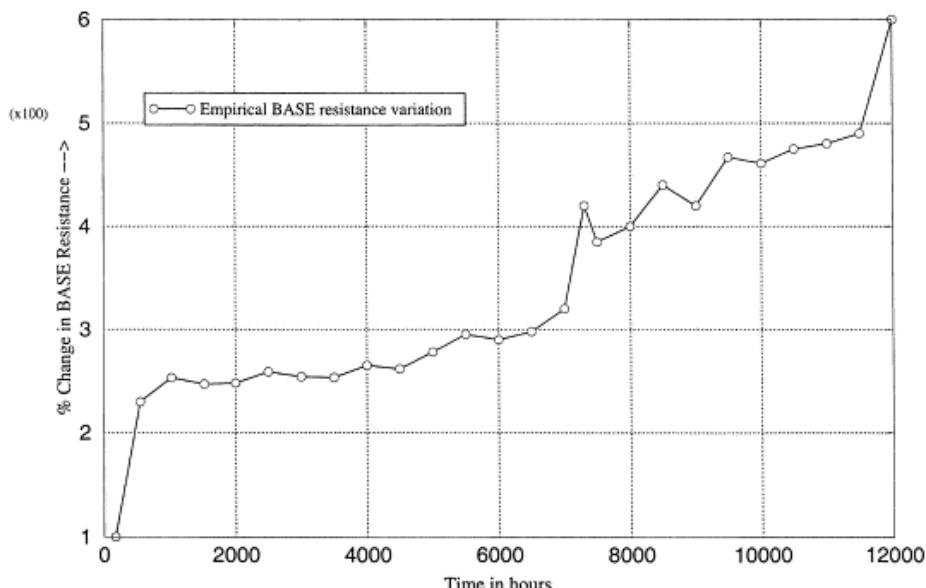


Figura 32 Variación de la resistencia del BASE en función del tiempo (método empírico) [29].

Se realiza un análisis de regresión de los datos obtenidos (Figura 33), para poder obtener expresiones que se ajusten al comportamiento experimental y poder predecir el comportamiento del electrolito en base a las ecuaciones generadas. Las funciones

empleadas son logarítmicas, exponenciales y potenciales. Éstas curvas de ajuste reflejan solamente la variación de la resistencia del electrolito, asumiendo que no se producen variaciones de resistencia a lo largo del tubo.

Curvas de ajuste:

- Exponencial: $R_{base} = 0.71 \times e^{(9 \times 10^{-5} \times time)}$
- Potencial: $R_{base} = 0.05 \times time^{0.374}$
- Logarítmica: $R_{base} = -1.98 + 0.393 \times \ln(time)$

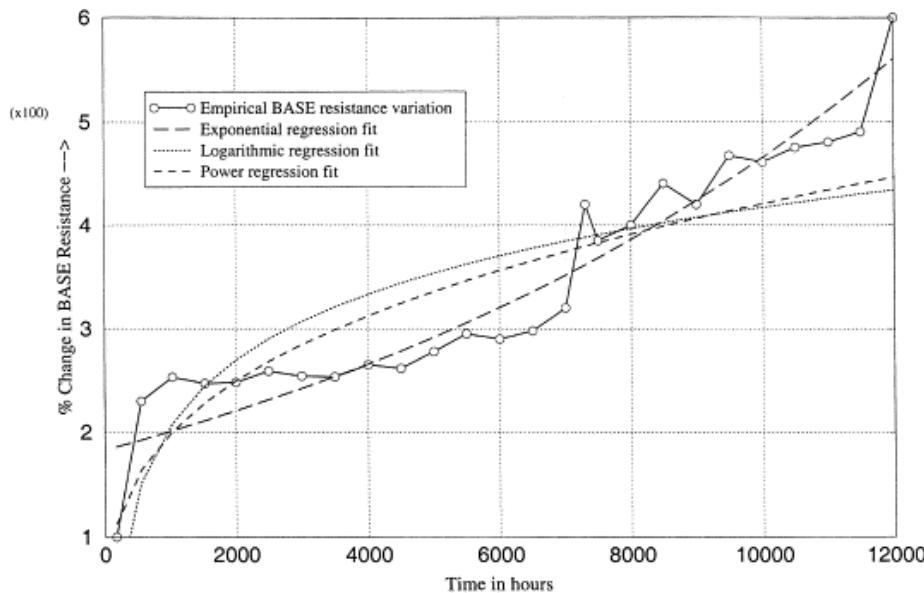


Figura 33 Variación de la resistencia del BASE en función del tiempo (métodos de ajuste teóricos) [29].

En la siguiente gráfica podemos observar como a partir dos datos experimentales se extrae y modela la potencia hasta las 100000h (Figura 34). Gracias a ello vemos que la degradación de la potencia durante las 7000 h iniciales de funcionamiento es debida casi exclusivamente a la degradación del BASE. A partir de las 12000 h, la resistencia del BASE es el 57.8% de la resistencia interna total del AMTEC [29]. Por ello podemos concluir, que el BASE es el componente que perjudica en mayor medida la potencia generada por el AMTEC.

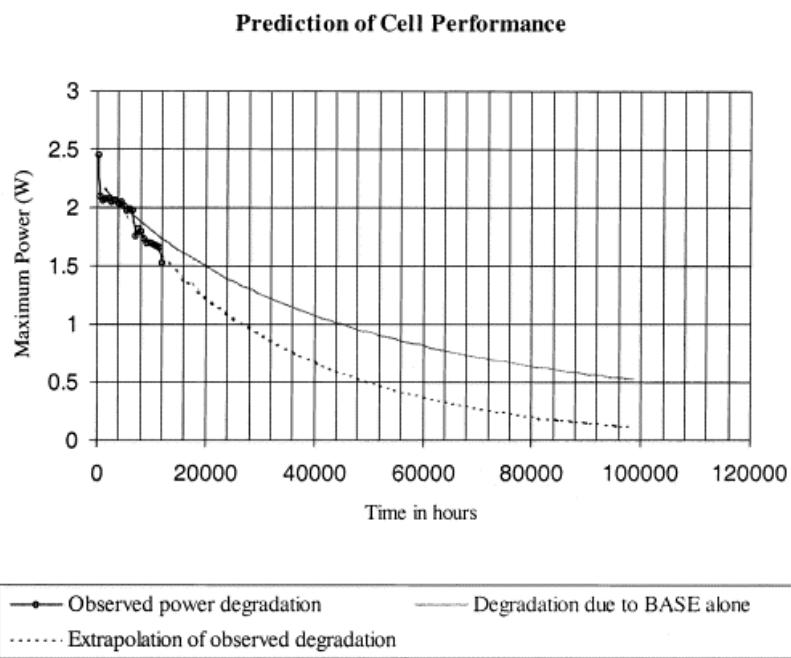


Figura 34 Extrapolación de los datos experimentales. Degradación potencia vs tiempo [29].

4. ANEXO 4. CICLO TERMODINÁMICO AMTEC

4.1. CICLO TERMODINÁMICO DEL FLUIDO

Se ha representado termodinámicamente el ciclo realizado por sodio en cada uno de sus estados para un caso determinado, Figura 35.

Cada uno de los estados corresponde físicamente a las siguientes partes de la celda:

1. Condensador (dissipación de calor)
2. Bomba
3. Evaporador (absorción de calor)
4. BASE
5. Cátodo
6. Columna de sodio vapor

En este ejemplo se emplean 0.001 kmol (0.032 kg) y opera entre 600 K y 1200 K en condensador y evaporador respectivamente [4].

En el estado 1, se corresponde con la entrada del condensador, el sodio se encuentra en estado vapor, con T=600 K y P= 7 Pa.

- 1 → 2 Condensación isotérmica e isobárica.
- 2 → 3 Presurización isotérmica del sodio líquido (bomba).
- 3 → 4 Absorción de calor isobara e isocora en el evaporador.
- 4 → 5 Evaporación isoterma e isobara.
- 5 → 6 Expansión isoterma hasta presión inicial.
- 6 → 1 Cesión de calor del sodio vapor, se inicia el ciclo de nuevo.

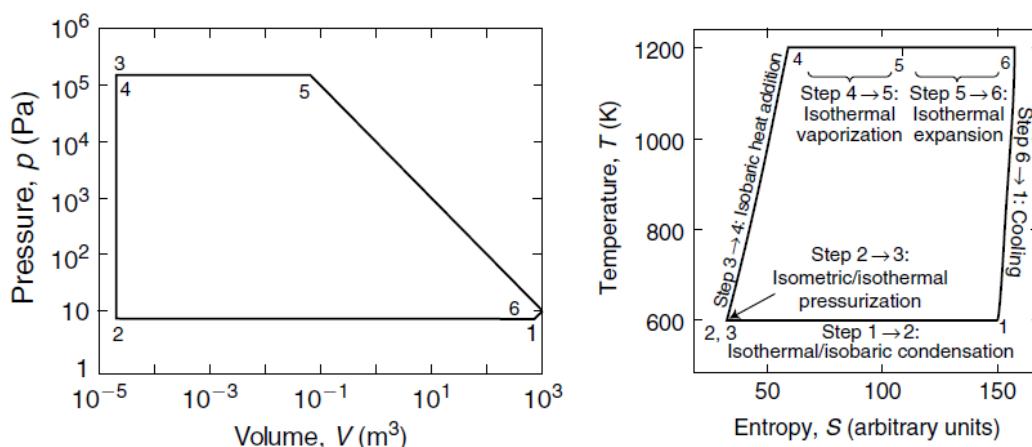


Figura 35 Ciclo termodinámico del sodio en celda AMTEC [4].



REFERENCIAS

- [1] A.J. Moulson, J.M. Herbert; Electroceramics: Materials, properties and applications. Ed Chapman & Hall.
- [2] Electroceramics Material properties application, A.J. Moulson, J.M. Herber
- [3] Electroquímica moderna, vol 2, J. O'M Bockris, A.K.N. Reddy, Ed. Reverté S.A.
- [4] Fundamentals of Renewable Energy Process; Elsevier Inc. Chapter 7 AMTEC.
- [5] Handbook ceramic and glasses, ASM international Engineered materials handbook
- [6] Heat Pipes, P. Dunn y D. A. Reay, Oxford, New York : Pergamon Press, 1982.
- [7] http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Beta_alumina.htm, material Science and Engineering, Octubre 2012.
- [8] <http://ecolocalizer.com/2009/10/25/clinton-climate-initiative-focusses-on-the-south-african-sun/>, Mapa radiación solar Noviembre 2012.
- [9] <http://qats.com/cms/2011/04/06/what-is-a-heat-pipe-and-how-does-it-work-in-thermal-management-part-1-of-2/>, Electronics cooling blog, Enero 2013.
- [10]<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/anisotropy/diffusion.php>, Anisotropic diffusion, Octubre 2012.
- [11]<http://www.eoi.es/blogs/robertogonzalez/2011/12/18/plan-de-energias-renovables-per-2011-2020/>, Mapa energía solar España, Noviembre 2012.
- [12]<http://www.evwind.com/2013/01/26/tsk-construira-en-marruecos-una-termosolar-de-160-mw-para-un-consorcio-liderado-por-acwa-power/>, Noviembre 2012.
- [13]<http://www.globalspec.com/reference/36068/203279/2-2-operation-of-heat-pipes>, Operation of heat pipes, Diciembre 2012.
- [14]<http://www.hardcore-modding.com/articulo-43.html>, Enero 2012.
- [15]<http://www.iea.org/>, septiembre 2012
- [16]http://www.mincyt.gov.ar/noticias/noticias_detalles.php?id_noticia=880, Noviembre 2012.
- [17]<http://www.mpoweruk.com/amtec.htm>, Battery and Energy technologies, Septiembre 2012.
- [18]<http://www.psa.es/webesp/installaciones/parabolicos.php>, Noviembre 2012.
- [19]http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_en/kap_2/basics/b2_1_6.html, Ion crystals, Octubre 2012.
- [20]https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermophysical_Properties:_Sodium, Diciembre 2012.
- [21] Impacto macroeconómico del Sector Solar Termoeléctrico en España, Deloitte, www.protermosolar.com, Octubre 2012.
- [22] Internal self heat piping AMTEC cell, Patent No.: US 6,239,350 B1, United States Patent, , May 2001.

- [23] Kotaro Tanaka; Concept design of solar thermal receiver using alkali metal thermal to electric converter. 9 December 2008.
- [24] La transferencia de calor, A.F Mills, Ed. Mc Graw Hill, Enero 1999.
- [25] M.A. Ryan, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena. The alkali metal thermal to electric converter for solar system exploration.
- [26] M.A.K. Lodhi, A. Daloglu, Design and material variation for an improved power output of AMTEC cells, 10 June 2000.
- [27] M.A.K. Lodhi, Justin B. Briggs; Temperature effect of AMTEC electrodes, 18 April 2007.
- [28] M.A.K. Lodhi, M.S. Chowdhury; The role of electrodes in power degradation of AMTEC: analysis and simulation, 8 November 2000.
- [29] M.A.K. Lodhi, P. Vijayaraghavan, A. Daloglu; Simulation and analysis of time-dependent degradation behavior of AMTEC. 22 October 2000.
- [30] M.A.K. Lodhi, P. Vijayaraghavan, A. Daloglu; Time-dependent BASE performance and power degradation in AMTEC. 22 May 2000.
- [31] M.A.K. Lodhi, Siew Choo Soon, M. Mohibullah; Temperature-dependent grain growth model for AMTEC electrodes. 5 March 2004.
- [32] M.E. Rojas, M.C. de Andrés, L. González, Designing capillary systems to enhance heat transfer in LS3 parabolic through collectors for direct steam generation, 21 May 2007.
- [33] Marcos A. Brito, Eduardo N. Zapico, Modelo matemático de un “heat pipe” aplicable al sistema de control de un nanosatélite, 13 Noviembre 2012.
- [34] Mohamed S. El-Glenk, Jean-Michel Tournier; Performance comparison of potassium and sodium vapor anode, multitube AMTEC converters, 30 April 2001.
- [35] Patrik Nemec, Alexander Caja, Milan Malcho, Mathematical and computer modeling for heat transfer limitations of heat pipe, 21 June 2011.
- [36] Principles of electrochemistry, Jiri Koryta, Jirí Dvorák, Ladislav Kavan, Chichester, England : John Wiley & Sons, cop.1993
- [37] Química General Principios y aplicaciones modernas, Petrucci Harwood, Ed. Petience Hall.
- [38] Química General Principios y aplicaciones modernas, Petrucci Harwood, Ed. Petience Hall.
- [39] Shuang-Ying Wu, Lan Xiao, Yiding Cao, You-Rong Li; A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation. 19 May 2009.
- [40] Xiaochuan Lu, Guanguang Xia, John P. Lemmon, Zhenguo Yang; Advanced materials for sodium-beta alumina batteries: Status, challenges and perspectives. 1 Octubre 2009.

SÍMBOLOS

| | |
|--------------|--|
| A | Constante que describe el estado de vibración del cristal. |
| A_a | Área de apertura del disco parabólico, [m^2] |
| A_c | Área de la apertura de entrada del receptor, [m^2] |
| A_v | Área transversal del heat pipe de vapor circulante [m^2] |
| A_w | Área transversal del heat pipe de fluido circulante [m^2] |
| A_E | Área de del electrodo en contacto con el BASE, [m^2] |
| B | Corriente de intercambio, [$A K^{1/2} Pa^{-1} m^2$] |
| C | Ratio de concentración geométrica, [–]. |
| c | Velocidad del sonido [$m s^{-1}$] |
| c_{pl} | Poder calorífico, sodio líquido, [$J kg^{-1} K$] |
| D | Diámetro de la cavidad,[m] |
| d | Diámetro del poro [m] |
| D_{hv} | Diámetro hidráulico del vapor |
| D_i | Coeficiente de auto-difusión de iones “ i ” [$S m^{-1}$]. |
| F | Constante de Faraday, 96,485 [C/mol] |
| f_B | Coeficiente igual a $\frac{R_g T_B}{F}$, [V^{-1}] |
| G | Factor geométrico (o morfológico) de las pérdidas de presión, [–]. |
| Gr_L | Número de Grashof en función de la longitud (L). |
| g | Aceleración de la gravedad, 9.807 [$m s^{-2}$] |
| ΔH_S | Variación de entalpía asociada a la generación de defectos de Schottky, [J] |
| ΔH_F | Variación de entalpía asociada a la generación de defectos de Frenkel, [J] |
| h | Anchura de la mecha, [m] |
| h_c | Coeficiente de transferencia de calor por convección, [$J s^{-1} m^{-2} K^{-1}$] |
| h_{fg} | Calor latente de vaporización de sodio, [$J kg^{-1}$] |
| I | Corriente a través del BASE, [A]. |
| I_s | Irradiación normal directa por unidad de área, [$J s^{-1} m^{-2}$] |
| j | Probabilidad de salto iónico. |
| J_x | Densidad de corriente en el electrodo, $J = I/A_E$ [$A m^{-2}$]. |
| J_x^o | Densidad de corriente de intercambio, [$A m^{-2}$] |
| J_0^o | Densidad de corriente de intercambio en estado de saturación, [$A m^{-2}$] |
| K | Conductividad térmica del aire en estado ambiente, [$J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$] |
| L | Dimensión característica de la cavidad, [m]. |
| l_{ad} | Longitud adiabática, [m]. |
| l_c | Longitud del condensador, [m]. |
| l_e | Longitud evaporador, [m]. |
| l_{ef} | Longitud eficaz del heat pipe, [m]. |
| l_t | Longitud total del heat pipe, [m]. |
| M | Factor de movilidad... |
| M_s | Peso molecular del sodio, 23 [$g mol^{-1}$]. |
| m_l | Masa de líquido, [kg] |

- \dot{m} Caudal másico del fluido circulante, [$kg\ s^{-1}$]
- \dot{m}_{max} Caudal másico máximo, [$kg\ s^{-1}$]
- n_S Concentración de los defectos de Schottky, Cantidad de intersticios sobre el número de iones.
- n_F Concentración de los defectos de Frenkel, Cantidad de intersticios sobre el número de iones.
- N Concentración iónica, Cantidad de iones sobre el resto de átomos.
- N_i Concentración iónica (de “i”), Cantidad de iones sobre el resto de átomos.
- N' Concentración de intersticios disponibles, Número de intersticios disponibles sobre la cantidad total de intersticios.
- Nu_L Número de Nusselt en función de la longitud (L).
- P_a Presión del vapor de sodio en la interface ánodo/BASE, [Pa].
- P_a^{oc} Presión del vapor de sodio en la interface ánodo/BASE en circuito abierto, [Pa].
- P_c Presión del vapor de sodio en la interface BASE/cátodo, [Pa].
- $P_{c'}$ Presión del vapor saturado a la temperatura del condensador, [Pa].
- P_c^{oc} Presión del vapor de sodio en la interface BASE/cátodo en circuito abierto, [Pa].
- P_v Presión de vapor de sodio, [Pa].
- ΔP_{cond} Caída de presión debida a la condensación, [Pa].
- ΔP_C Altura capilar, [Pa].
- $(\Delta P_C)_{máx}$ Altura capilar máxima, [Pa].
- ΔP_e Caída de presión debida a la evaporación en el electrodo, [Pa].
- ΔP_f Caída de presión debida al flujo de vapor entre la salida del cátodo y el condensador, [Pa].
- ΔP_G Altura gravitacional [Pa].
- ΔP_l Caída de presión de la fase líquida [Pa].
- ΔP_{pe} Pérdida de presión en el cátodo debida al flujo de vapor a través de éste, [Pa].
- P_{sat} Presión de saturación del sodio, [Pa].
- ΔP_t Caída de presión entre el cátodo y el condensador, [Pa].
- ΔP_v Caída de presión de la fase vapor, [Pa].
- Q_i Carga que iónica. [C]
- Q_l Pérdidas térmicas desde el receptor a los alrededores, [$J\ s^{-1}$].
- Q_{lc} Pérdidas por convección a través de la apertura del receptor, [$J\ s^{-1}$].
- Q_{lk} Pérdidas por conducción a través del receptor, [$J\ s^{-1}$].
- Q_{lo} Pérdidas ópticas en el receptor, [$J\ s^{-1}$].
- Q_{lr} Pérdidas por radiación a través de la apertura del receptor, [$J\ s^{-1}$].
- Q_s Energía solar incidente en el área de apertura del disco, [$J\ s^{-1}$].
- Q_u Energía útil, [$J\ s^{-1}$].
- \dot{Q}_a Calor transmisible, limitación arrastre, [$J\ s^{-1}$].
- \dot{Q}_e Calor transmisible, limitación ebullición, [$J\ s^{-1}$].
- \dot{Q}_{max} Calor máximo transmisible por el heat pipe, [$J\ s^{-1}$].
- \dot{Q}_s Calor transmisible, limitación sónica, [$J\ s^{-1}$].

| | |
|-------------|---|
| \dot{Q}_v | Calor transmisible, limitación viscosa, [$J \ s^{-1}$]. |
| q_{rad} | Perdidas por radiación, [$J \ s^{-1} \ m^{-2}$]. |
| R_B | Resistencia iónica del BASE, [$\Omega \ m^2$]. |
| Re | Número de Reynolds, [—] |
| R_g | Constante de los gases ideales, 8.314 [$J \ mol^{-1} \ K^{-1}$] |
| r_{ef} | Radio efectivo de la estructura capilar, [m]. |
| r_i | Radio interior del heat pipe, [m]. |
| r_n | Radio de nucleación, [m]. |
| r_p | Radio de poro, [m]. |
| r_v | Radio sección transversal de circulación de vapor, [m]. |
| T | Temperatura del fluido en cambio de fase, [K] |
| T_a | Temperatura ambiente, [K]. |
| T_B | Temperatura del BASE, [K]. |
| T_{cd} | Temperatura del condensador, [K]. |
| T_w | Temperatura media de operación de la pared en la cavidad, [K]. |
| V_0 | La fuerza electromotriz efectiva, [V]. |
| V^{oc} | Potencial de circuito abierto, [V]. |
| V_l | Volumen del líquido, [m^3] |
| v_v | Velocidad del vapor, [$m \ s^{-1}$] |
| We | Número de Weber, [—] |
| Z | Factor geométrico, [—]. |

Alfabeto griego

| | |
|------------------|---|
| β | Coeficiente de expansión volumétrica del aire ambiente, [K^{-1}]. |
| κ | Permeabilidad de la mecha, [m^2]. |
| λ | Factor de sombra, [—]. |
| λ_{ef} | Conductividad térmica efectiva, [$J \ s^{-1} \ m^{-1} \ K^{-1}$]. |
| λ_l | Conductividad térmica del fluido, [$J \ s^{-1} \ m^{-1} \ K^{-1}$]. |
| λ_m | Conductividad térmica del material del heat pipe, [$J \ s^{-1} \ m^{-1} \ K^{-1}$]. |
| μ_l | Viscosidad cinemática del líquido, [$m^2 \ s^{-1}$]. |
| μ_v | Viscosidad cinemática del vapor, [$m^2 \ s^{-1}$]. |
| ν | Viscosidad cinemática del aire ambiente, [$m^2 \ s^{-1}$]. |
| ϵ | Porosidad de la mecha, [—]. |
| ϵ_B | Emisividad de radiación del BASE, [—]. |
| ϵ_{cd} | Emisividad de radiación de la superficie del condensador, [—]. |
| ϵ_{eff} | Emitancia infrarroja efectiva de la cavidad, [—]. |
| ϵ_j | Energía de activación iónica, [J]. |
| ξ_x | Sobretensión de polarización (subíndice a=ánodo, c=cátodo), [V]. |
| θ | Ángulo de incidencia, [°]. |
| θ_e | Ángulo de contacto en el evaporador, [°]. |

| | |
|------------------|--|
| θ_c | Ángulo de contacto en el condensador, [$^\circ$]. |
| η_{AMTEC} | Rendimiento termo-eléctrico del AMTEC, [-]. |
| η_c | Rendimiento térmico del colector, [-]. |
| η_o | Rendimiento óptico, [-]. |
| $\eta_{overall}$ | Rendimiento total del sistema disco/AMTEC, [-]. |
| η_r | Rendimiento del receptor, [-]. |
| ρ | Reflectancia del disco, [-]. |
| ρ_B | Resistencia iónica del BASE, [$\Omega \text{ m}^2$]. |
| ρ_l | Densidad del sodio líquido, [kg m^{-3}]. |
| ρ_{mecha} | Densidad de la mecha, [kg m^{-3}]. |
| ρ_v | Densidad del sodio vapor, [kg m^{-3}]. |
| $\tau\alpha$ | Producto de transmitancia y absortancia, [-]. |
| γ | Factor de interceptación del receptor, [-]. |
| δ_B | Grosor del BASE, [m]. |
| σ_{SF} | Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} [\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$. |
| σ | Conductividad iónica, [S m^{-1}]. |
| σ_i | Corriente iónica, [S m^{-1}]. |
| σ_l | Tensión superficial, [N m^{-1}]. |
| σ_0 | Conductividad iónica inicial, [S m^{-1}]. |
| φ | Ángulo de inclinación de la cavidad, [radianes]. |
| ϕ | Inclinación del heat pipe, [$^\circ$]. |