



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Disipador de calor en una pila de  
combustible tipo PEM**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA:

**DAVID RAMÍREZ SÁNCHEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Luis Fernández Zayas



Ciudad Universitaria, México D.F.

Noviembre de 2009

# Índice

	<i>pág</i>
<b>Objetivo</b>	ii
<b>Capítulo 1. Antecedentes</b>	
1.1. Pilas de combustible	1
1.1.1. Funcionamiento de una pila de combustible	2
1.1.2. Tipos de pila de combustible y sus aplicaciones	3
1.2. Materiales compuestos	6
1.2.1. Tipos de materiales compuestos	7
1.2.2. Materiales compuestos carbono-carbono	9
1.3. Disipadores de calor	10
1.3.1. Mecanismos de transferencia de calor	10
<b>Capítulo 2. Definiciones</b>	12
2.1. Planteamiento del problema	12
2.2. Hipótesis sobre la solución del problema	18
<b>Capítulo 3. Diseño propuesto</b>	23
3.1. Diseño del disipador	22
3.2. Selección de materiales	25
<b>Capítulo 4. Simulación numérica</b>	26
4.1. Simulación utilizando Phoenics	26
<b>Capítulo 5. Síntesis de resultados</b>	29
5.1. Conclusiones	29
5.2. Recomendaciones	30

## **Objetivo**

El objetivo que se pretende alcanzar con este trabajo de investigación es diseñar un disipador de calor, capaz de maximizar la eficiencia de una celda de combustible tipo PEM, utilizando las ventajosas propiedades térmicas que presentan los materiales compuestos.

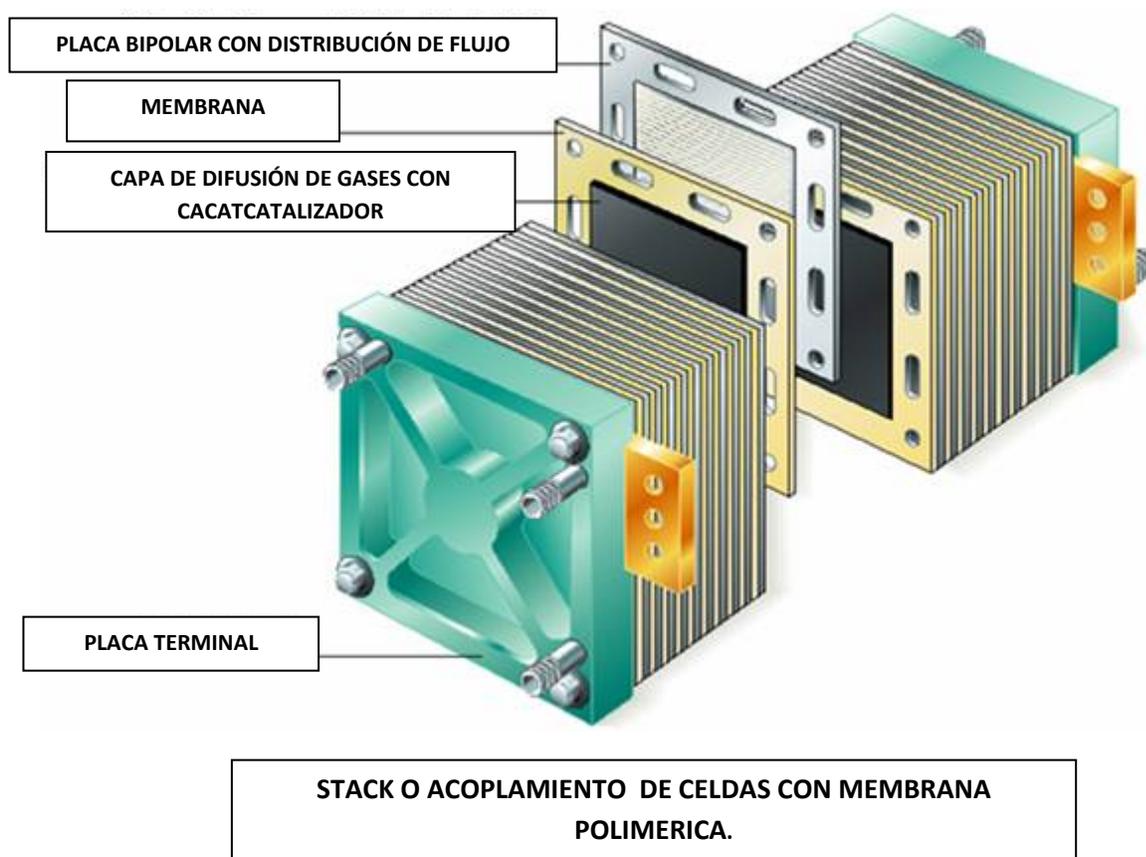
Además, se quiere incentivar a la industria manufacturera para poder impulsar la producción de materiales compuestos, específicamente los materiales del tipo carbono-carbono, ya que por el momento la poca atención que se presta a este tipo de compuesto hace al producto poco atractivo, desde el punto de vista económico, para el uso en tecnologías totalmente innovadoras, a pesar de que estos tipos de materiales compuestos presentan características superiores (mecánicas, térmicas, eléctricas, etc.) a la mayoría de los materiales compuestos.

En la espera de que las pilas de combustible se sigan convirtiendo en objeto de estudio y los avances tecnológicos se sigan dando tan rápido como lo estamos viviendo en estos momentos, el trabajo que se presenta también tiene como objetivo incrementar el campo de aplicaciones que se tiene hasta el momento dotando así, a este tipo de pila de combustible, las facilidades de producción de cada componente que la conforman.

# Capítulo 1. Antecedentes

## 1.1 Pilas de combustible

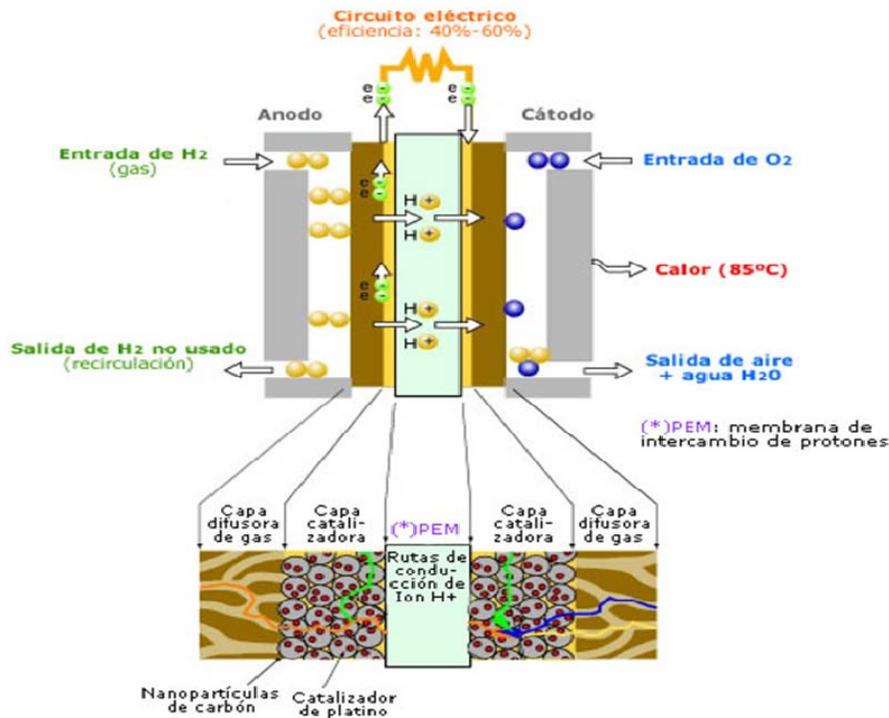
Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten directamente energía química en eléctrica, con una alta eficiencia. Sin partes móviles, operan de forma similar a las pilas secas, excepto que para la producción continua de electricidad requieren el suministro continuo de combustible, normalmente hidrógeno.



### 1.1.1 Funcionamiento de una pila de combustible

Las células o pilas de combustible funcionan bajo el principio de intercambio de carga electrolítica entre una placa negativa y una placa positiva. Cuando se utiliza hidrógeno como combustible básico se produce hidrólisis inversa, produciendo agua y calor como subproductos, sin producir contaminantes.

La celda en la que tiene lugar el proceso electroquímico está formada por tres elementos: un *ánodo*, un *electrolito* y un *cátodo*. En el *ánodo* se oxida el combustible (p.ej. hidrógeno, metano, gas natural) y se generan electrones, que circulan a través de un circuito externo hacia el *cátodo*, donde son consumidos en el proceso de reducción del oxígeno. El tipo de iones transportados a través del electrolito depende del tipo de pila que tengamos, siendo éstos generados/consumidos en los electrodos durante los procesos *redox* correspondientes.



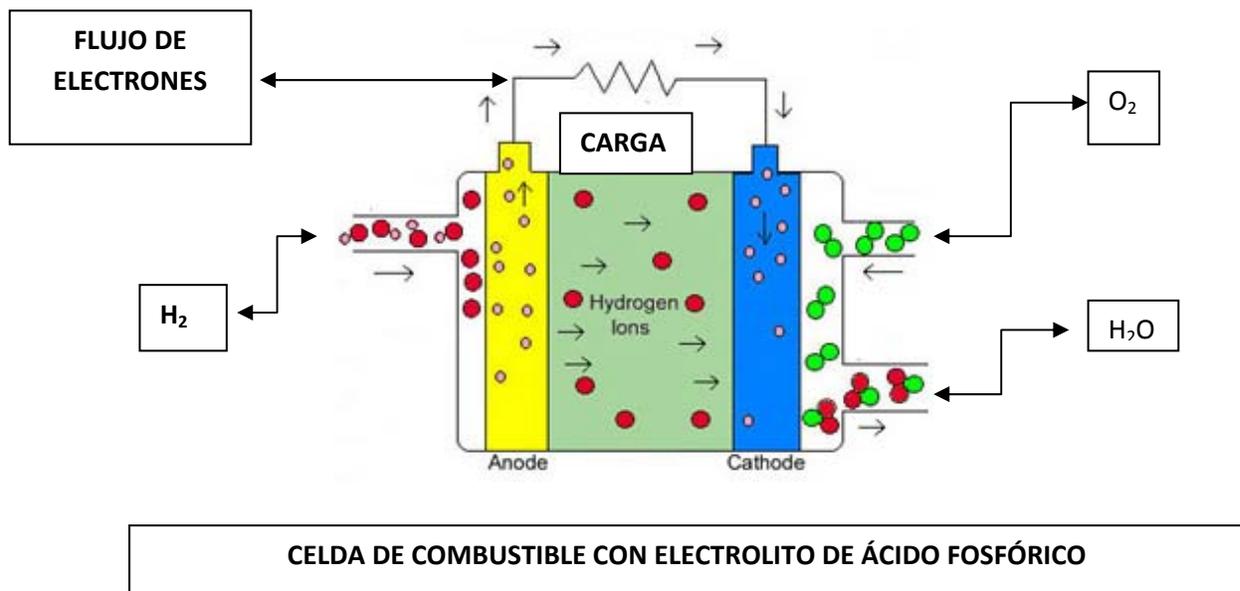
Esquema interno de una celda de combustible del tipo PEM

**ESQUEMA INTERNO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM**

## 1.1.2 Tipos de pila de combustible y sus aplicaciones

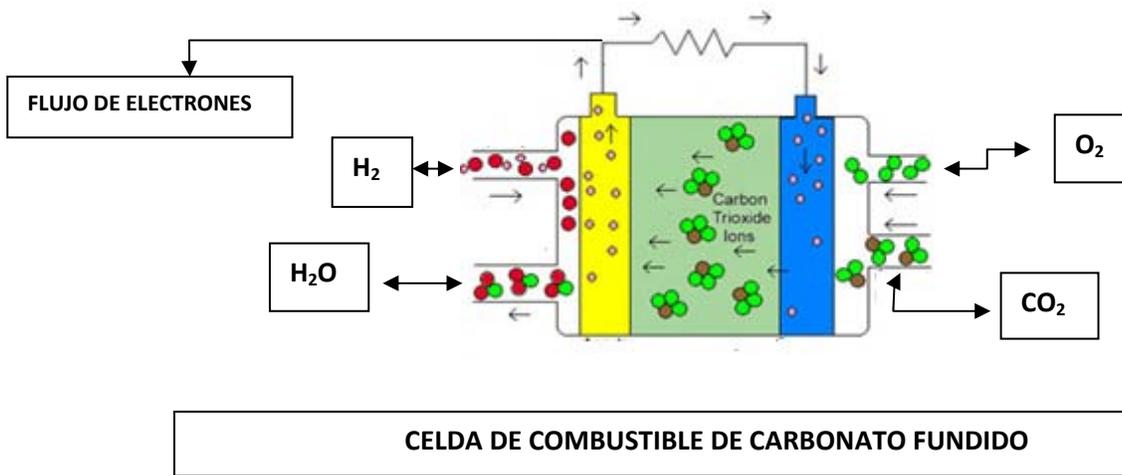
Se pueden distinguir diversos tipos de pilas de combustible según el electrolito (sustancia que sirve como puente para el intercambio de iones entre el ánodo y el cátodo) utilizado:

**Ácido fosfórico (PACFs):** Estas células de combustible utilizan ácido fosfórico como electrolito y generan electricidad a más del 40% - y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración – comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 400°F. Este es el tipo de células de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. También pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.

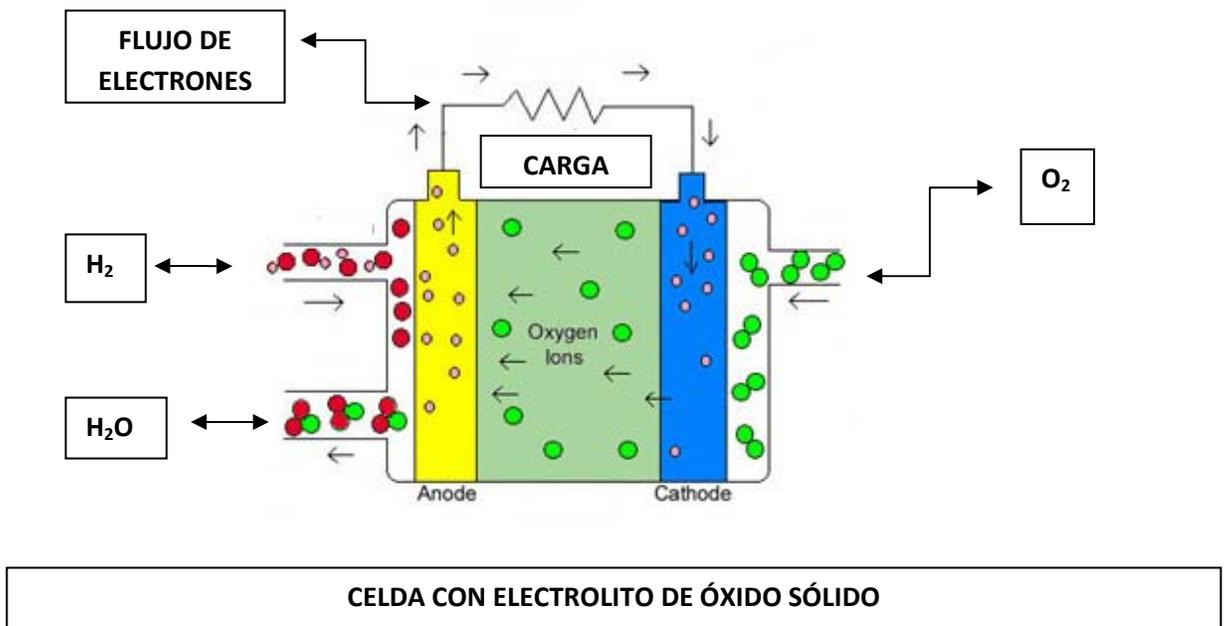


**Carbonato fundido (MFCs):** El electrolito es una sal carbonatada, que funde a una temperatura de operación de aproximadamente 1200°F (temperatura

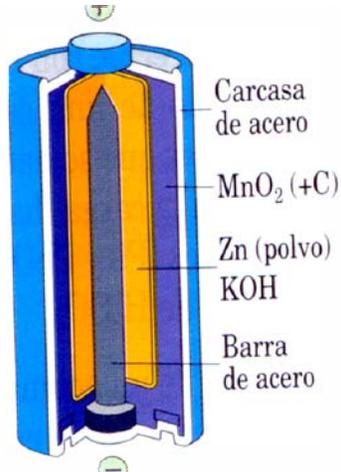
de trabajo). Se pueden obtener de ellas altas eficiencias combustible-electricidad y la capacidad para consumir combustibles con base de carbón.



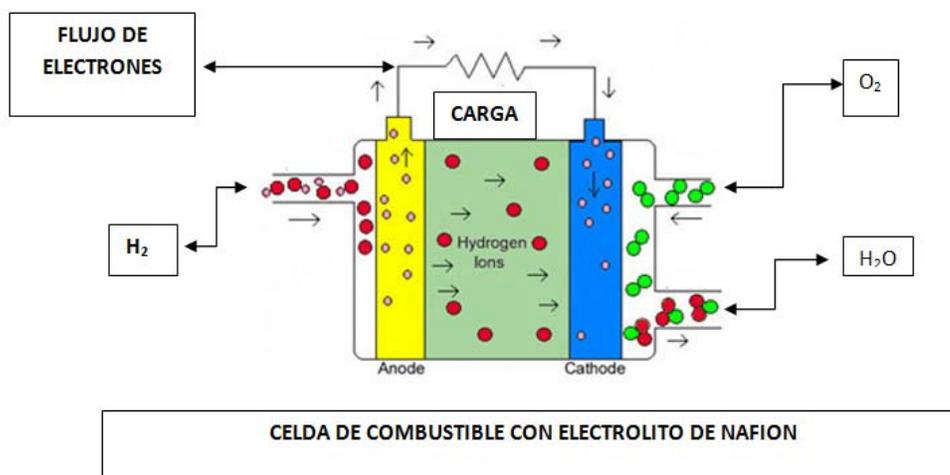
**Óxido sólido (SOFCs):** Un sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los  $1000^\circ C$ . Los rendimientos de generación de potencia pueden alcanzar un 60%.



**Alcalinas** Contiene electrolito líquido alcalino (normalmente hidróxido de potasio) y pueden alcanzar un rendimiento del 70%. Son ya utilizadas en aplicaciones espaciales.

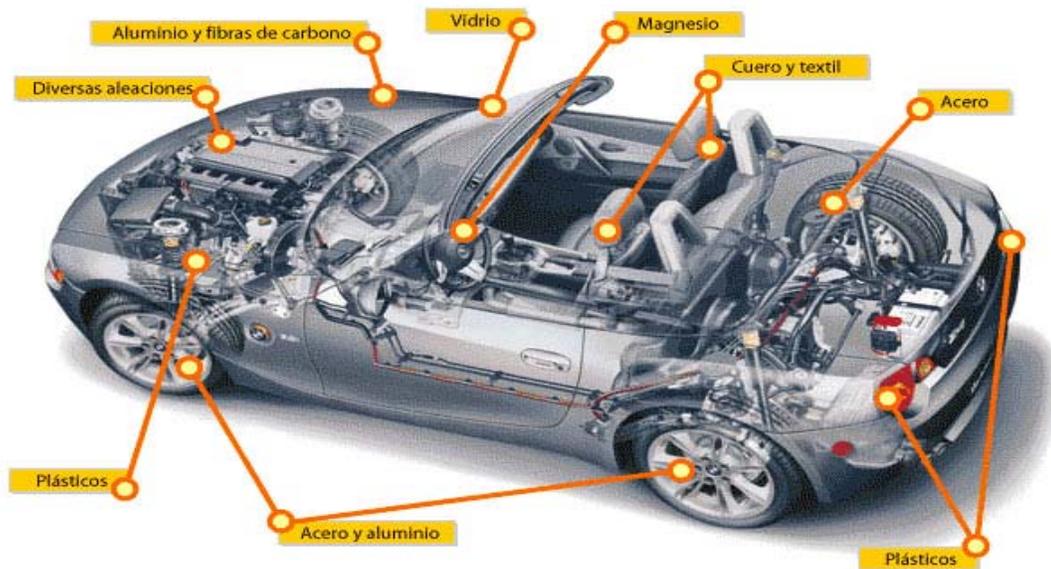


**Polímero sólido o Membrana de Intercambio Protónico (PEM)**  
 Contienen un polímero sólido como electrolito. Estas células operan a relativamente bajas temperaturas (80°C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tanto en equipos para la generación de energía eléctrica estacionarios como para automóviles.



## 1.2 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos que están formados por combinaciones de metales, cerámicos y polímeros. Las propiedades que se obtienen de estas combinaciones son superiores a la de los materiales que los forman por separado, lo que hace que su utilización cada vez sea más imponente sobre todo en aquellas piezas en las que se necesitan propiedades combinadas, en la que un material (polímero, metal o cerámico) por sí solo no las puede brindar. Las propiedades que se obtienen son un producto de la combinación de los refuerzos que se utilicen y de la matriz que soporta al refuerzo en los materiales compuestos, el cual también juega un papel importante en la aplicación por lo que resulta necesario hacer referencia a las propiedades que se obtienen al combinar refuerzo-matriz.

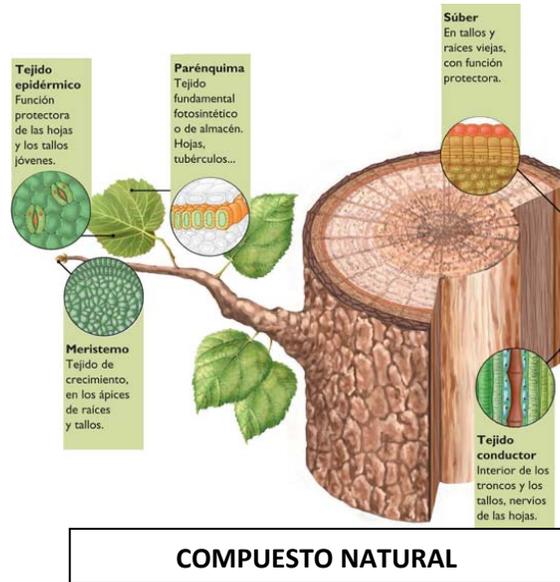


APLICACIONES DE LOS DIFERENTES MATERIALES COMPUESTOS

## 1.2.1 Tipos de materiales compuestos

En general los materiales compuestos se pueden clasificar como:

**MATERIALES COMPUESTOS NATURALES;** tales como madera, hueso, bambú, músculos y otros tejidos.



**MATERIALES MICRO-COMPUESTOS;** aleaciones metálicas y termoplásticos endurecidos, hojas para moldeo continuo y termoplásticos reforzados.



**MACROCOMPOSITES O MATERIALES MACROCOMPUESTOS;** son tales como el acero galvanizado, vigas de hormigón armado, palas de helicópteros y esquís.



Para estos tipos de compuestos, en especial los MATERIALES MICRO-COMPUESTOS, presentan la siguiente clasificación:

**FIBRAS CONTINUAS EN MATRIZ:** orientadas o en distribución aleatoria.

**FIBRAS CORTAS EN MATRIZ:** orientadas o en distribución aleatoria.

**PARTICULADO** (macro-partículas esféricas, planas, elipsoidales, irregulares, huecas o macizas) en matriz.

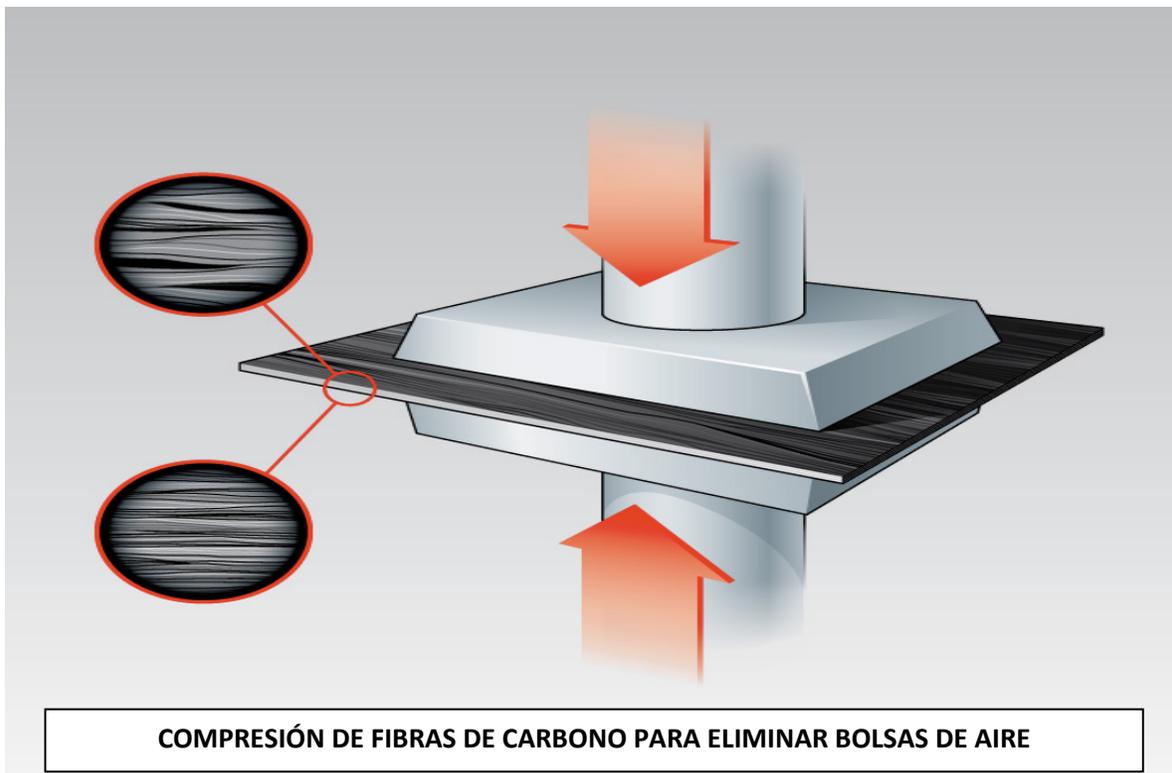
**DISPERSIÓN:** es un caso similar al particulado pero con tamaño de partículas  $>10^{-8}$ m.

**ESTRUCTURAS LAMINARES.**

**ESQUELETOS O REDES INTERPENETRANTES.**

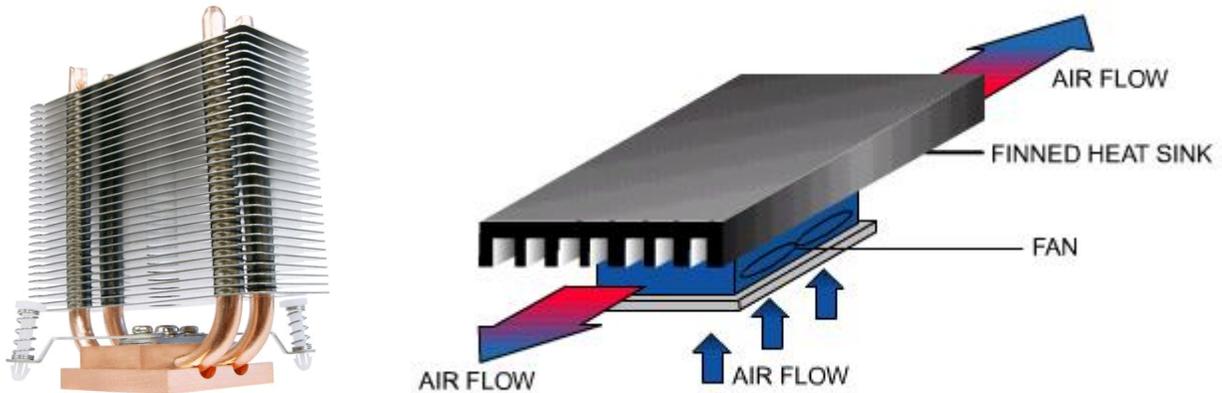
## 1.2.2 Materiales compuestos carbono-carbono

**Los materiales compuestos carbono-carbono** son un tipo particular de materiales compuestos en los que se combinan un refuerzo de carbono (generalmente una FC) y una matriz también carbonosa (resinas, polímeros o breas, con las que primero se impregna la fibra y luego se carbonizan para dar lugar a esta matriz). Este tipo de materiales se caracterizan por ser ligeros y a la vez densos, con altas prestaciones mecánicas, alta resistencia térmica (en atmósfera no oxidante) y muy inertes ante la mayoría de agentes químicos. Por el contrario su punto débil es la gran reactividad en atmósfera oxidante cuando se sobrepasan los 400-500 °C.



## 1.3 Disipadores de calor

Un disipador de calor es un objeto que absorbe o disipa calor para evitar un posible sobrecalentamiento. El principio de operación radica en la transferencia de energía térmica de un objeto con alta temperatura a uno con baja temperatura, de manera que se pueda hablar de un equilibrio térmico.

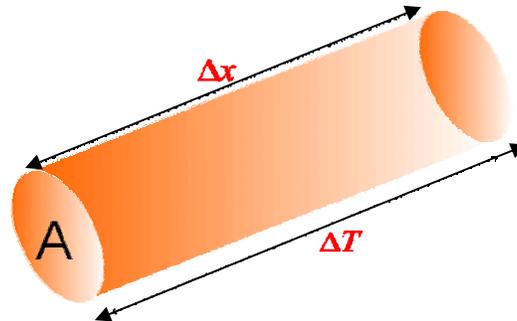


ALGUNAS CONFIGURACIONES EN DISIPADORES DE CALOR

### 1.3.1 Mecanismo de transferencia de calor

Existen tres mecanismos de transferencia de calor, llamados: conducción, convección y radiación. Cada uno de estos modos puede estudiarse por separado, aunque la mayoría de las aplicaciones en la ingeniería se hagan de manera combinada. No obstante, un estudio detallado de cada uno de estos mecanismos permite extender fácilmente el análisis al problema combinado.

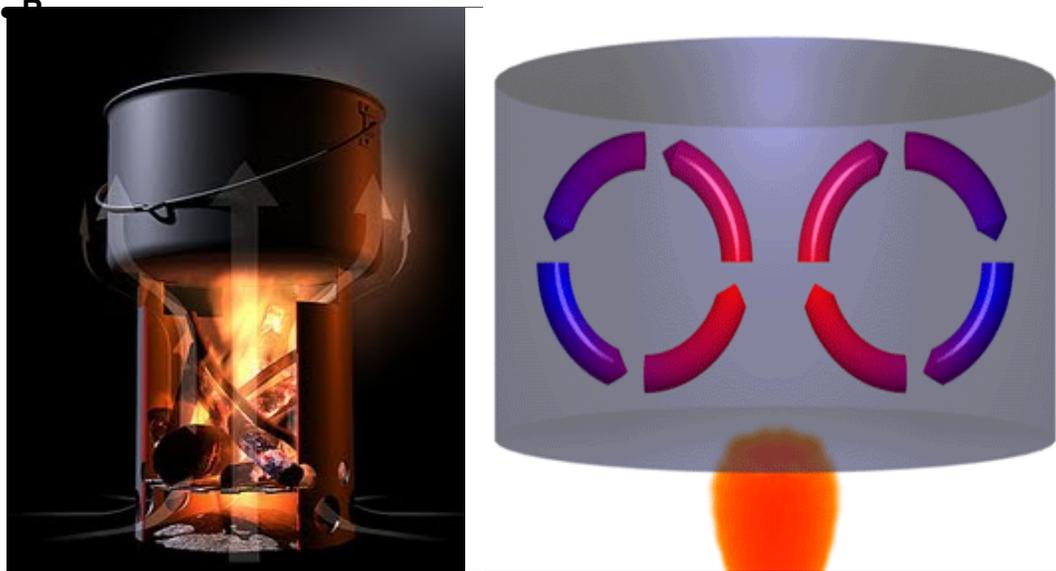
- **Conducción:** Es la transferencia de calor a través de un material estacionario, tal como un sólido o un fluido en reposo o en régimen laminar. Este tipo de transmisión no involucra un movimiento relativo de las partículas del cuerpo y por tanto se le define como *difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio*.



$$I = \frac{\delta Q}{\Delta t} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

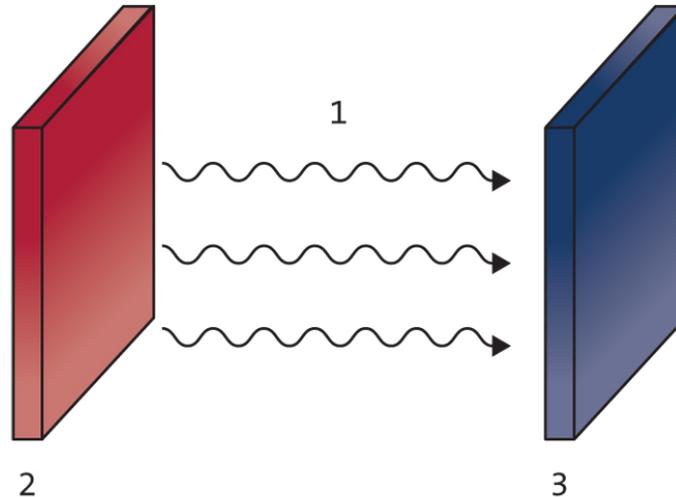
**TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN**

- Convección:** Es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de la mezcla. Físicamente se puede entender como una *difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio más una transferencia de energía debida a un movimiento en todo el volumen (advección)*. La convección se clasifica en; forzada (se obliga al fluido a fluir mediante medios externos) y natural (el movimiento del fluido es debido a causas naturales, como el efecto de flotación).



**TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN**

- **Radiación:** Es la transferencia de calor que no requiere de un medio para su propagación. La energía irradiada se mueve a la velocidad de la luz. Por ejemplo, el calor irradiado por el Sol se puede intercambiar entre la superficie solar y la superficie de la Tierra sin calentar el espacio de transición.



TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

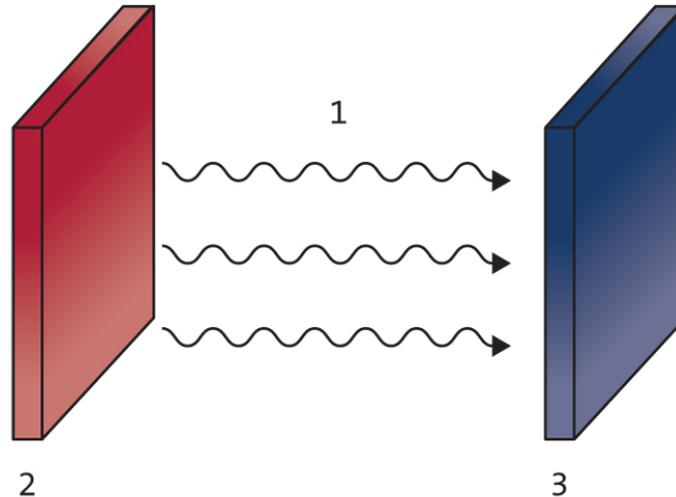
## 2 Capítulo 2. Definiciones

### 2.1 Planteamiento del problema

El planteamiento de este trabajo nace de la necesidad que existe en la actualidad de alcanzar motores mucho más eficientes, tomando diferentes ramas de la ingeniería para poder consolidar materiales y técnicas que puedan ser útiles para cumplir con ciertas exigencias que demanda el mercado.

Para esta investigación el análisis se realizará con base en la pila de combustible tipo PEM. Dicha pila presenta características de alto rendimiento como: Alta densidad de potencia, temperatura de operación baja (encendido rápido), uso de materiales “baratos” y comunes, alta eficiencia mayor al 15%, cero emisiones o casi cero, silenciosas, no tiene partes móviles, menor mantenimiento, compactas, alta densidad de potencia, flexibilidad de combustible, etc. Para poder aprovechar al máximo todas estas características que posee la pila de combustible existen ciertas restricciones con las que se debe tener especial atención, como la hidratación de la membrana, la velocidad de reacción en el cátodo, la presión de entrada del combustible o el control de la temperatura de la celda, siendo esta última la parte esencial de la investigación.

- **Radiación:** Es la transferencia de calor que no requiere de un medio para su propagación. La energía irradiada se mueve a la velocidad de la luz. Por ejemplo, el calor irradiado por el Sol se puede intercambiar entre la superficie solar y la superficie de la Tierra sin calentar el espacio de transición.



TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

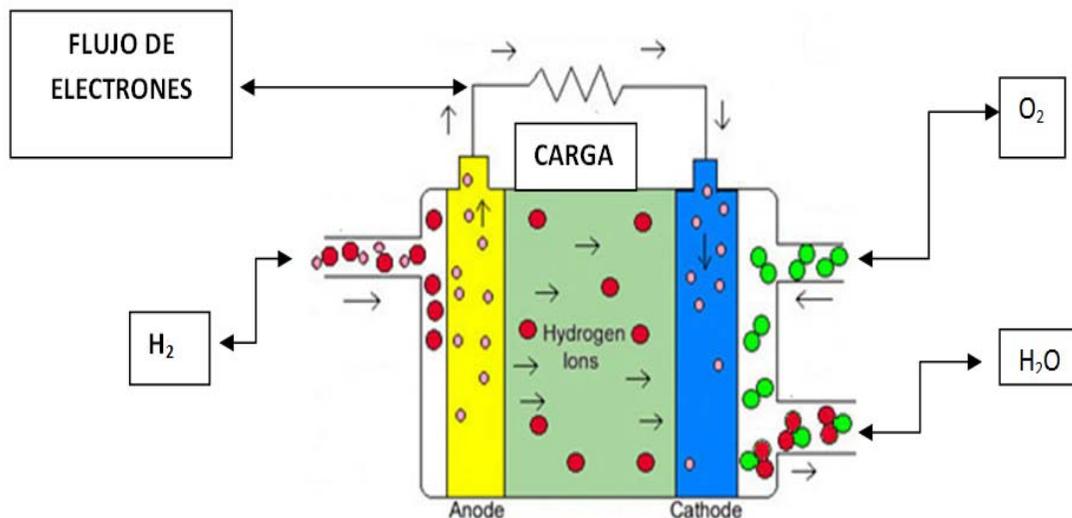
## 2 Capítulo 2. Definiciones

### 2.1 Planteamiento del problema

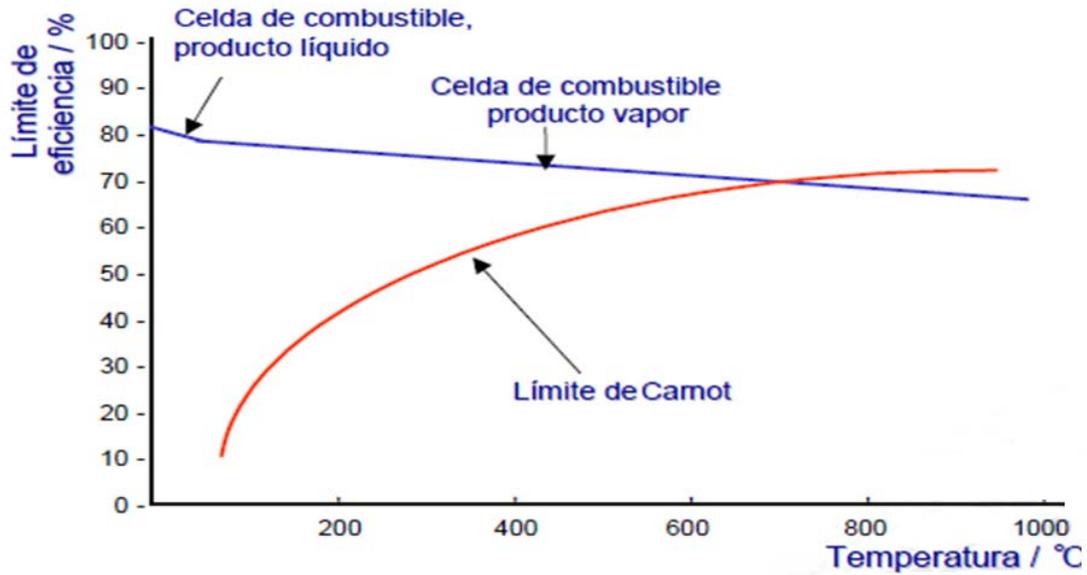
El planteamiento de este trabajo nace de la necesidad que existe en la actualidad de alcanzar motores mucho más eficientes, tomando diferentes ramas de la ingeniería para poder consolidar materiales y técnicas que puedan ser útiles para cumplir con ciertas exigencias que demanda el mercado.

Para esta investigación el análisis se realizará con base en la pila de combustible tipo PEM. Dicha pila presenta características de alto rendimiento como: Alta densidad de potencia, temperatura de operación baja (encendido rápido), uso de materiales “baratos” y comunes, alta eficiencia mayor al 15%, cero emisiones o casi cero, silenciosas, no tiene partes móviles, menor mantenimiento, compactas, alta densidad de potencia, flexibilidad de combustible, etc. Para poder aprovechar al máximo todas estas características que posee la pila de combustible existen ciertas restricciones con las que se debe tener especial atención, como la hidratación de la membrana, la velocidad de reacción en el cátodo, la presión de entrada del combustible o el control de la temperatura de la celda, siendo esta última la parte esencial de la investigación.

Teniendo en cuenta el principio de funcionamiento de la PEMFC Figura 1, determinando qué es lo que entra y qué es lo que tenemos como resultado, de manera teórica, con la ecuación de *Nernst*, se ha establecido el comportamiento ideal que podría tener la pila de combustible, valores que se ven reflejados en la gráfica de la Figura 2. A lo largo del tiempo las investigaciones que se han estado llevando a cabo han sido orientadas a la maximización de su eficiencia.



**Figura 1: Esquema de funcionamiento de una PEMFC.**



**Figura 2: Comparativa de la eficiencia total de una PEMFC y una máquina de combustión interna.**

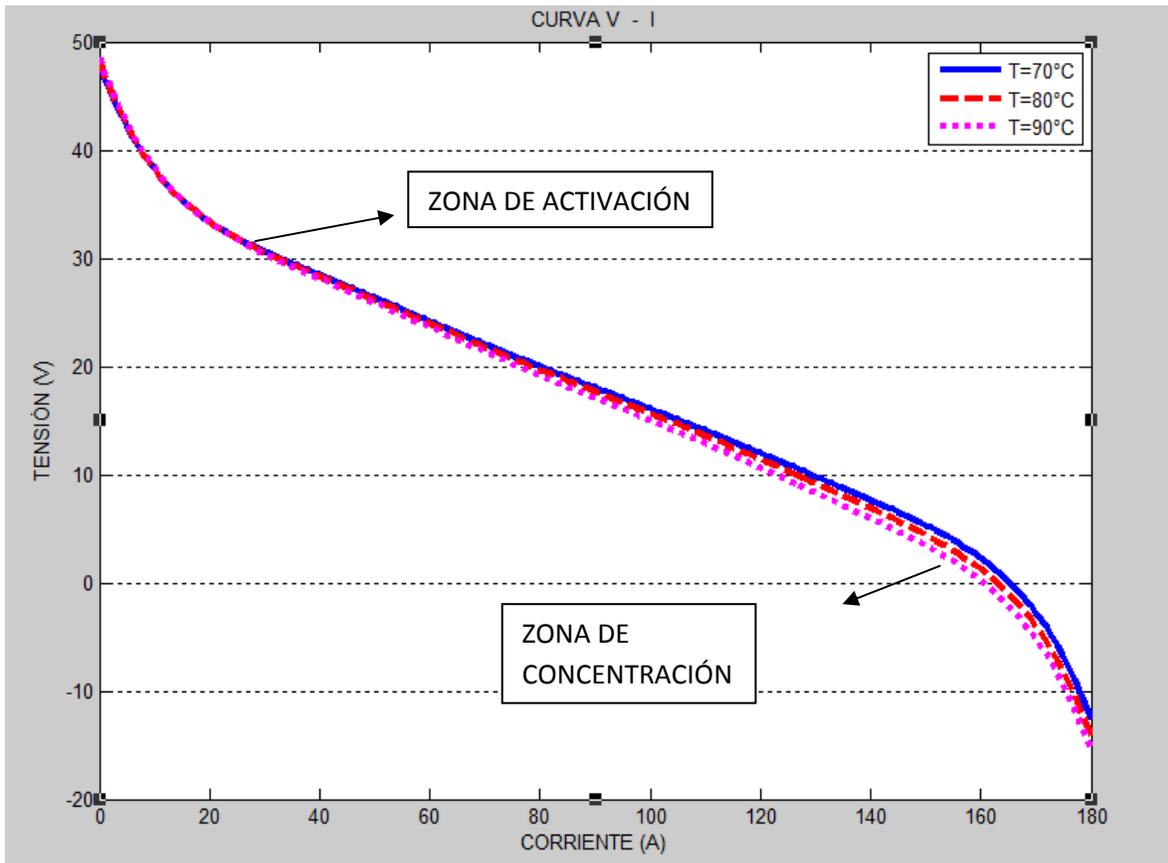
Se trata de acercar los valores reales a los ideales, creando o rediseñando diferentes aditamentos óptimos que permitan cumplir dicho requerimiento. Para este caso el estudio se enfocará a la parte térmica de la pila donde se tratará el disipador de calor, de manera que se pueda modificar su comportamiento termodinámico y así ganar potencia generada.

En la Figura 3 se propone el módulo de potencia Nexa de la pila PEM de Ballard, por medio de la literatura, una pila de combustible con 35 celdas y cada una tiene 50 cm<sup>2</sup> de área. Su comportamiento se ve alterado de manera significativa cuando comenzamos a variar la temperatura de operación, comprobándose así la vulnerabilidad de la membrana. Cuando el tiempo aumenta la temperatura aumenta y por ende la resistencia del *nafion* se incrementa haciendo más difícil el paso de protones.

Para poder visualizar el comportamiento de la pila se emplea la siguiente ecuación:

$$V = N_{cell} [ E_0 - (b_0 T^2 + b_1 T + b_2) \log(I/A_{cell}) - (r_0 T^2 + r_1 T + r_2)(I/A_{cell}) - (m_0 P^2 + m_1 P + m_2) \exp(n_0 P^2 + n_1 P + n_2)(I/A_{cell}) ]$$

Esta ecuación se obtiene a través de la ecuación de Nerst, utilizada para calcular el potencial de reducción de un electrodo cuando las condiciones no son las tipo



**Figura 3: Curva de polarización de la PEMFC al variar la temperatura.**

estándar (concentración 1 M, presión de 1 atm, temperatura de 298K ó 25°C). De esta manera se recoge la relación de tensión y corriente que demanda la carga. Debe recordarse que en este tipo de dispositivos electroquímicos existen caídas de tensión debido a las pérdidas por activación para superar la barrera de potencial, a las pérdidas resistivas tanto en la membrana como en los electrodos, y a los efectos de concentración de iones. Existe una diferencia entre la tensión que deriva de la energía libre de Gibbs liberada en la reacción  $H_2 + O_2 = H_2O$ ,  $E_0$ , y la tensión real entre los electrodos de la pila. De acuerdo a lo ya mencionado el término logarítmico aparece en el modelo de la pila y alude a las pérdidas por activación mientras que el término exponencial representa las pérdidas por concentración.

Podemos ahora, de acuerdo con lo ya obtenido, hablar del control de la eficiencia ( $\eta$ ) de una pila de combustible, definida como el cociente de la potencia eléctrica generada por la pila y la potencia suministrada por el flujo del hidrógeno, es decir;

$$\eta = \frac{V \cdot I}{m_H h_H}$$

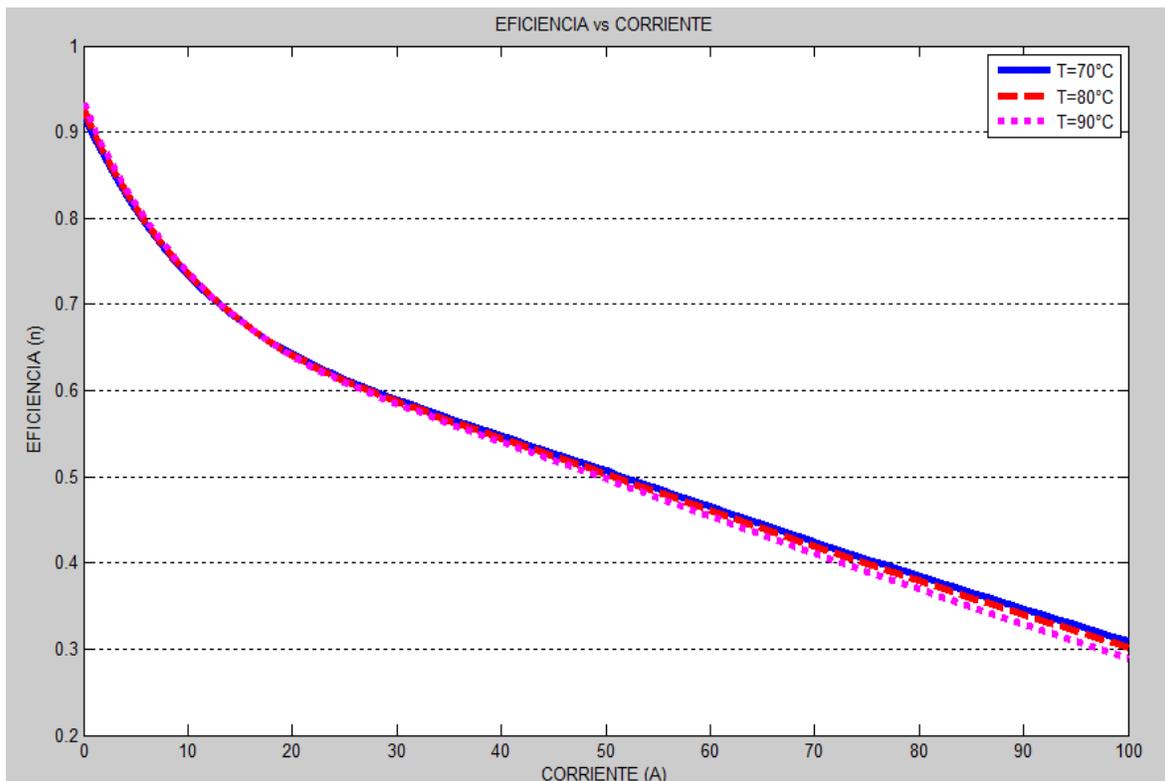
$m_H$ : Flujo de hidrógeno suministrado  
 $h_H$ : Poder calorífico del hidrógeno

Para poder obtener el flujo de hidrógeno suministrado ( $m_H$ ) debemos considerar la ecuación de Faraday

$$m_H = \frac{I \cdot M_{H_2}}{2F}$$

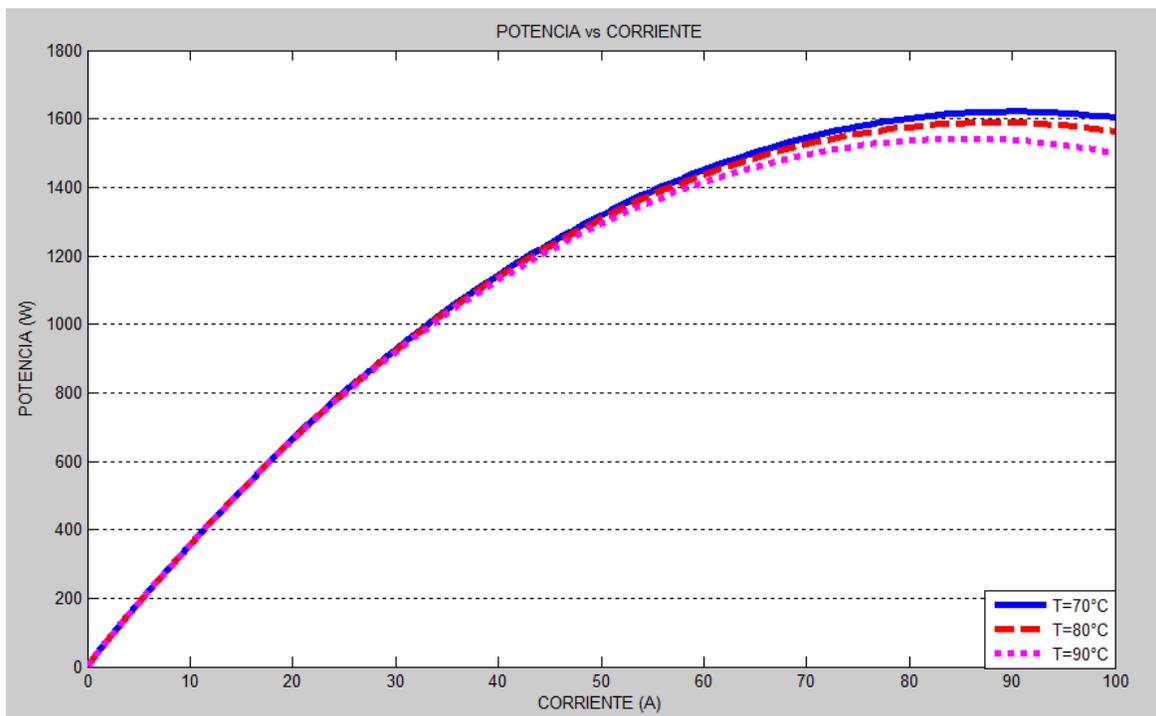
$I$ : Corriente suministrada  
 $M_{H_2}$ : Masa molecular del hidrógeno  
 $F$ : Constante de Faraday

De acuerdo con estas consideraciones se puede observar, en la figura 4, el comportamiento de la pila cuando la temperatura comienza a tomar diferentes valores y se nota que cada vez que aumenta la temperatura la eficiencia comienza a decrecer. Este fenómeno se tenía identificado ya que existe una relación directa entre la eficiencia y la tensión.



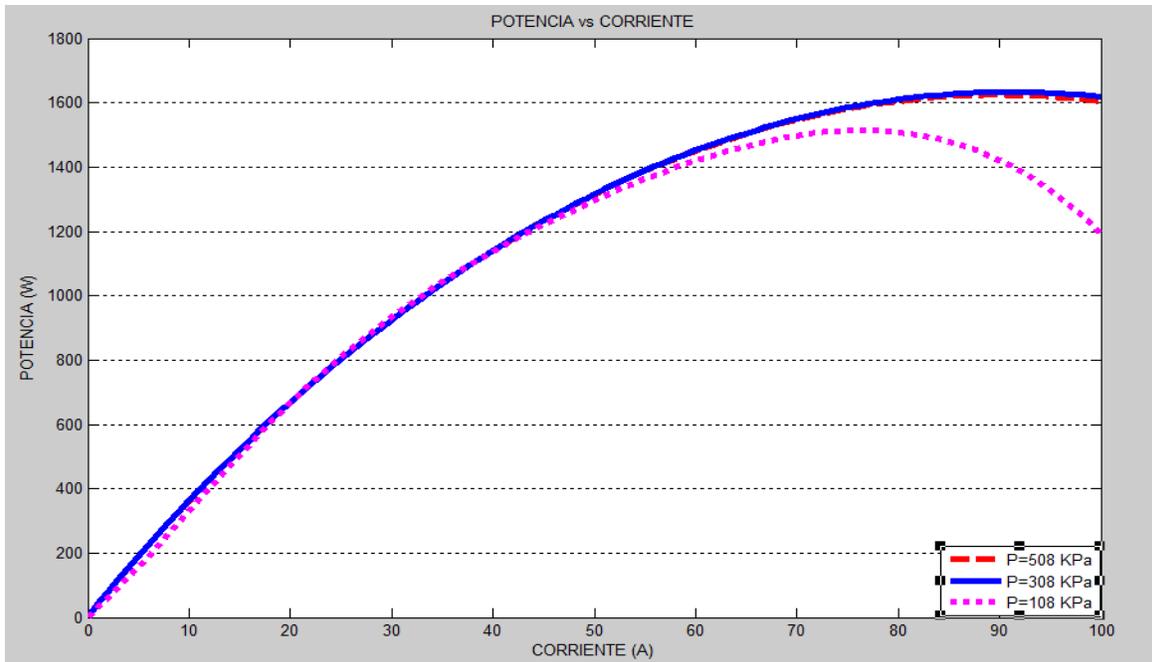
**Figura 4: La eficiencia de la PEMFC en función de la corriente, variando la temperatura de operación.**

Para poder hablar de la potencia entregada por la pila, en el entendido de que es el producto de la tensión y la corriente, se tienen que establecer datos que puedan generar valores máximos y para poder conocerlos se tienen que establecer las condiciones a las que podría trabajar la pila. En la figura 5 se puede visualizar el comportamiento de la potencia con la corriente con diferentes valores en la temperatura de operación. Como se puede apreciar, el punto de máxima eficiencia no es fijo, por lo que se tiene que considerar una función que relacione la intensidad del punto de máxima potencia con las condiciones de temperatura, para poder así encontrar la corriente que garantice la máxima potencia en la pila.



**Figura 5: Potencia entregada por la PEMFC, sujeta a diferentes temperaturas de operación.**

Para este caso sí interesa saber el comportamiento de la pila cuando los valores de la presión de operación cambian (ver figura 6), para poder ajustarlos a los datos obtenidos a partir del modelo teórico de la pila.



**Figura 6: Potencia entregada por la PEMFC a diferentes temperaturas de operación.**

## 2.2 Hipótesis sobre la solución del problema

Para poder maximizar la eficiencia de la pila de combustible tipo PEM se propone un disipador de calor, como el que se muestra en la figura 7, cuyo objetivo térmico es mantener la temperatura (siendo la ideal para esta pila de combustible) alrededor de los 62°C, como se aprecia en las gráficas de las figuras 8 y 9 respectivamente, lo que produce un incremento en la potencia y por consecuencia en la eficiencia de la pila de combustible al mantener la temperatura a este valor y de manera constante. Asimismo se presenta un programa hecho en MATLAB 7.7 en las que intervienen las ecuaciones y los valores que se le dan al disipador para lograr la temperatura de operación con la que se pretende trabajar.

PROGRAMA:

t=0.001;	Ka=0.0258;	W2=0.1;
Lf=0.001;	Kc=960;	W21=1.585;
Lb=0.001;	Ve=4.88;	Pe=1800;
s=0.002;	Pr=0.7;	v=1.81e-5;
	W1=0.05;	T=20;

$$\begin{aligned}
 N &= 3; \\
 A_b &= ((N-1) \cdot (s-t)) \cdot W_1; \\
 A_f &= 2 \cdot W_1 \cdot L_f; \\
 A_t &= N \cdot A_f + A_b; \\
 Re &= (V_e \cdot W_1) / \nu; \\
 h &= (K_a / W_1) \cdot 0.664 \cdot Re \\
 &\quad \cdot Pr^{1/3}; \\
 m &= (2 \cdot h / K_c \cdot t)^{1/2}; \\
 L_c &= L_f; \\
 n &= \tanh((m \cdot L_c) / (m \cdot L_c));
 \end{aligned}$$

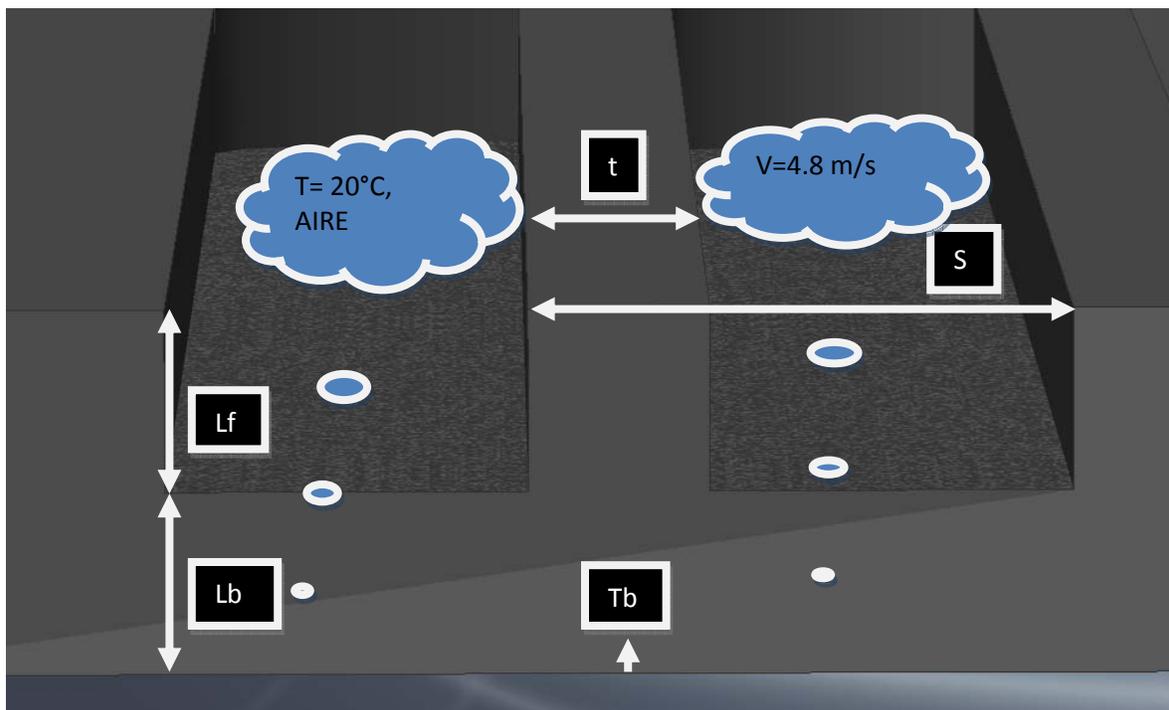
$$\begin{aligned}
 R_t &= (h \cdot A_t \cdot (1 - \\
 &\quad (N \cdot A_f / A_t) \cdot (1 - n)))^{-1}; \\
 R_b &= L_b / K_c \cdot W_1 \cdot W_2; \\
 T_b &= T + Pe \cdot (R_b + R_t) \\
 C_p &= 1007; \\
 m_1 &= 1.4 \cdot 10^{-2}; \\
 C_m &= m_1 \cdot C_p; \\
 NTU &= W_1 \cdot W_2 \cdot h / C_m; \\
 E &= 1 - 2.72^{-NTU}; \\
 T_o &= T + E \cdot (80)
 \end{aligned}$$

$$T_b =$$

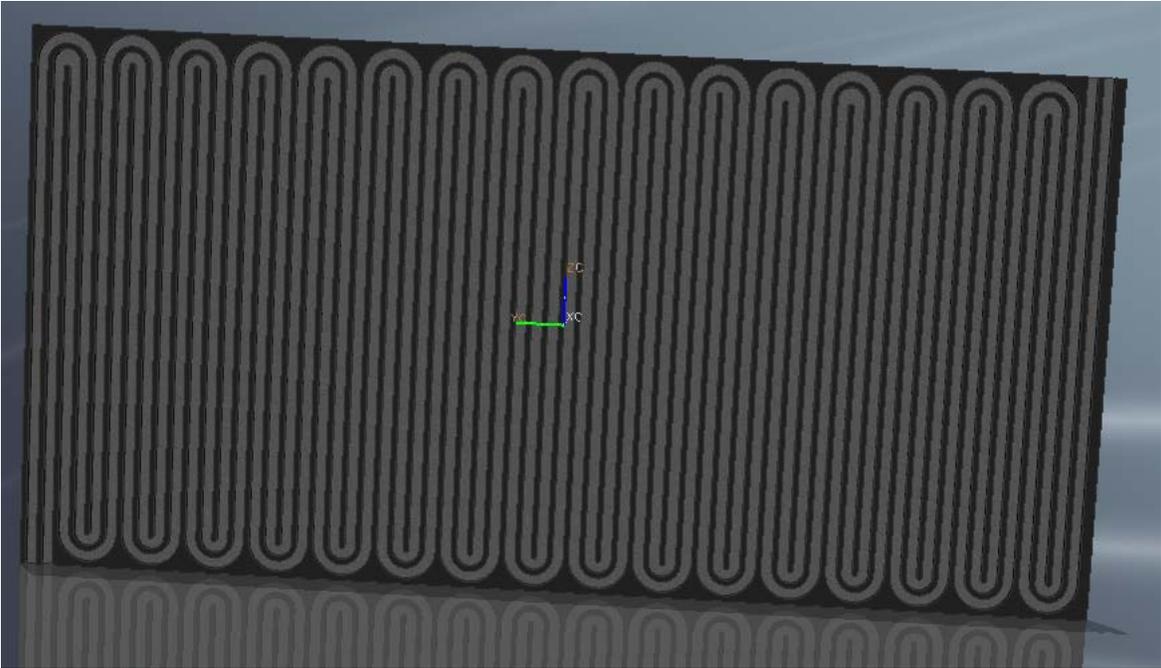
62.1514

$$T_o =$$

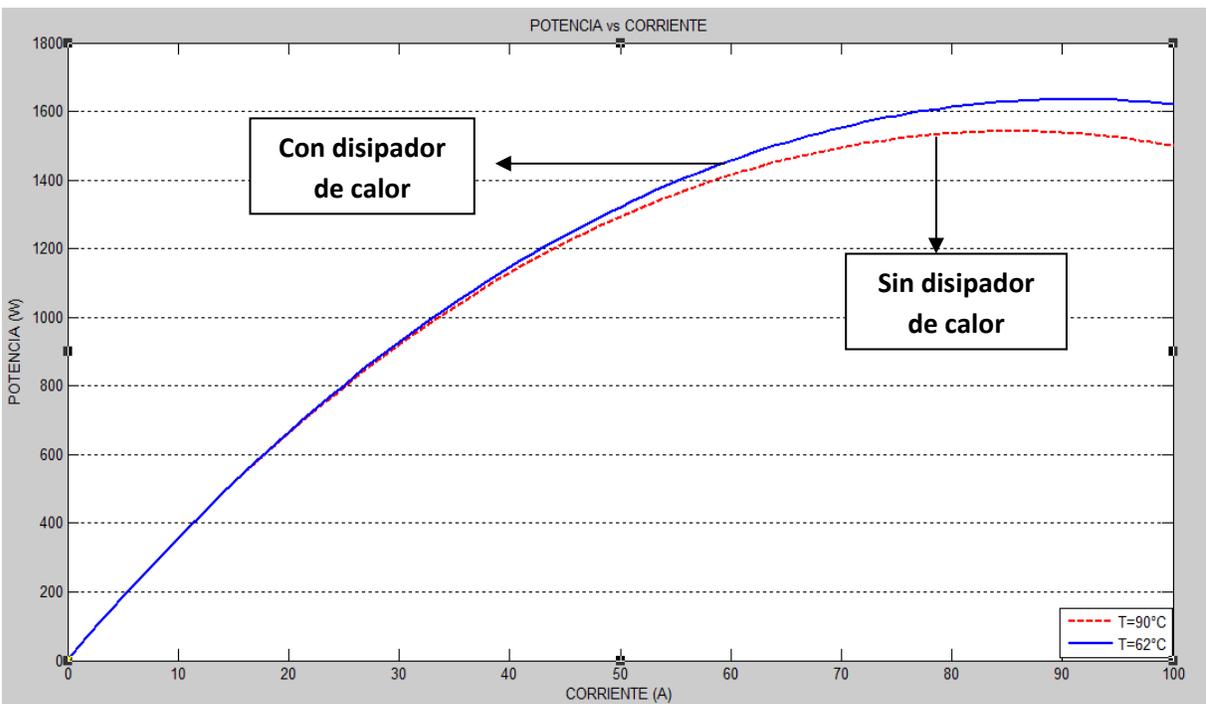
81.3354



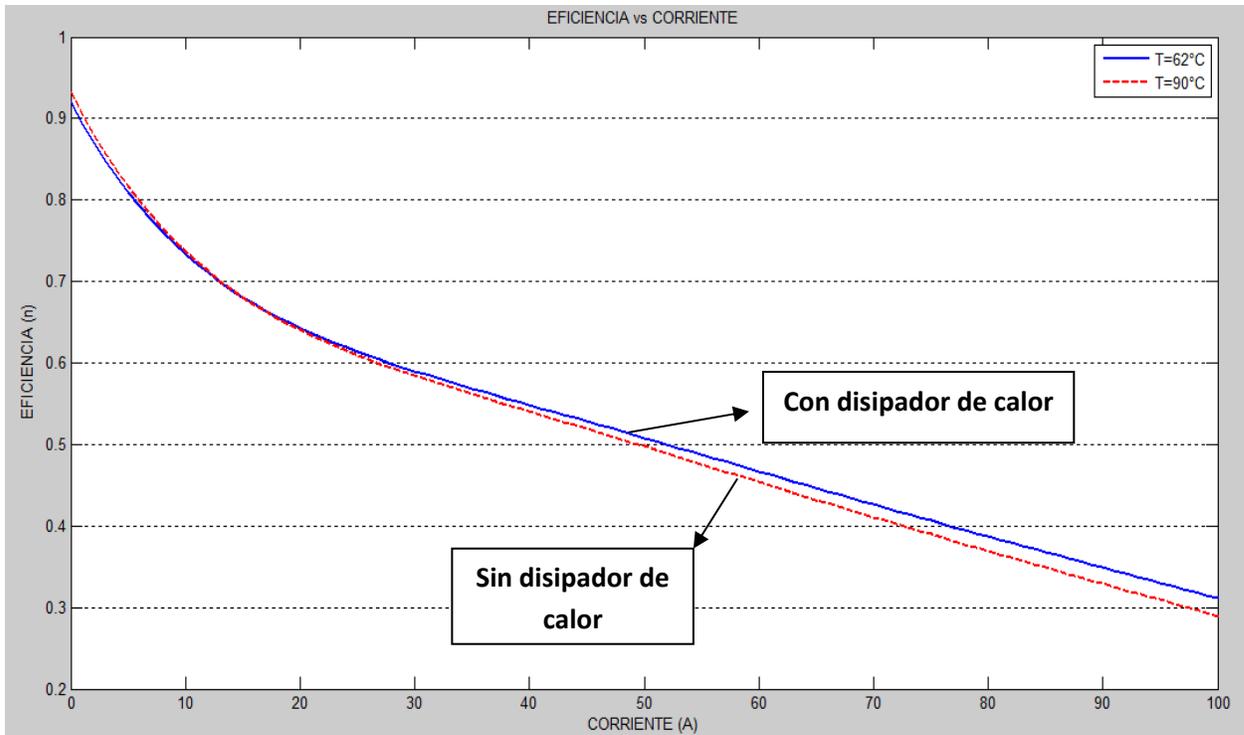
Esquema para el planteamiento del problema y obtención de datos geométricos y de operación.



**Figura 7: Diseño del disipador de calor para la PEMFC.**



**Figura 8: Comparativa de la potencia entregada por la PEMFC con y sin disipador de calor.**



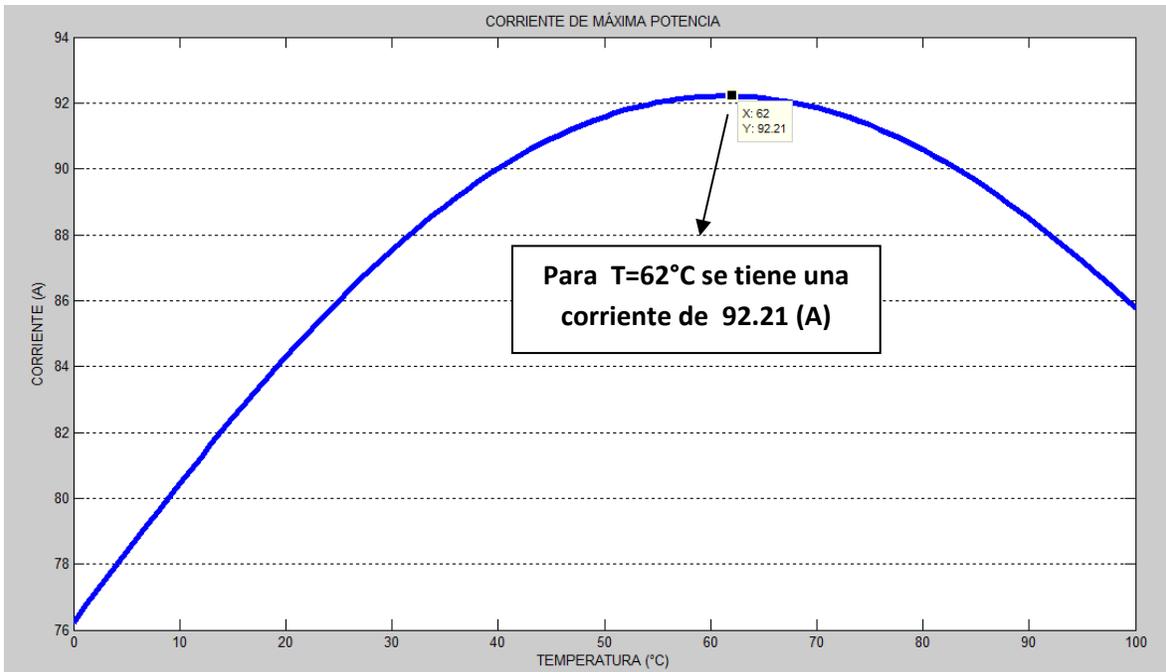
**Figura 9: Eficiencia de la PEMFC con y sin disipador de calor.**

Para poder encontrar la función que nos garantice el punto máximo, se tienen que definir dos polinomios que expresen su dependencia con la temperatura  $Q(T)$  y un polinomio que mantiene su dependencia de la presión  $R(P)$ . El objetivo es encontrar los polinomios que se ajusten a los datos obtenidos a partir del modelo teórico de la pila.

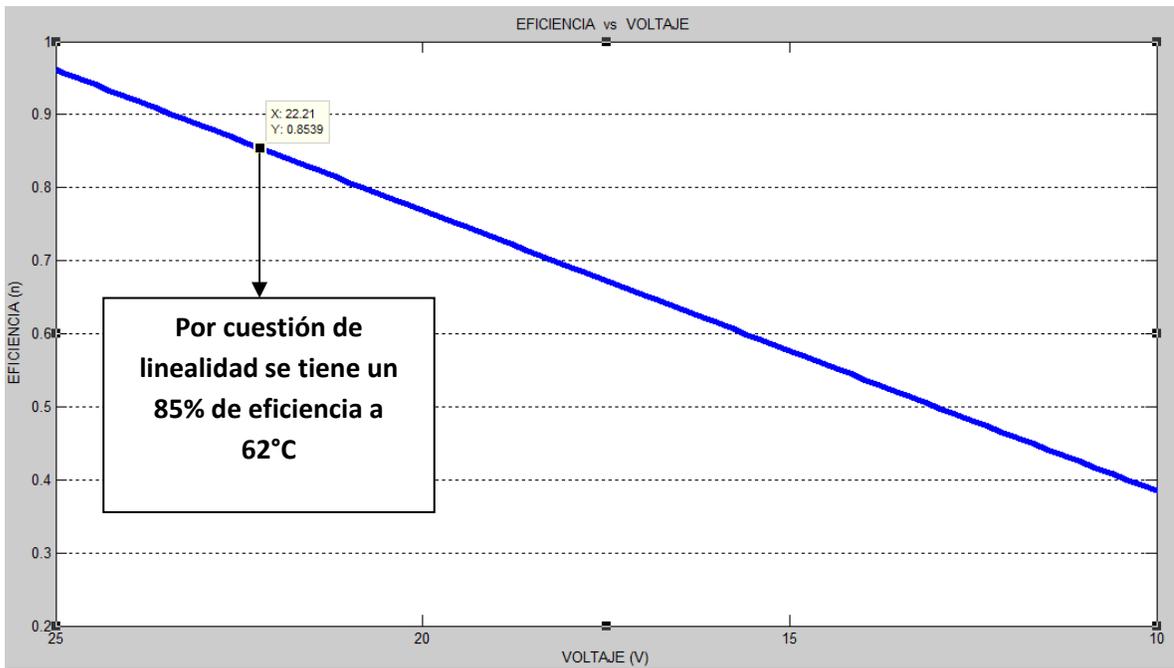
La función objetivo responde a la siguiente:

$$I_{mpp}(T,P) = k * Q(T) * R(P)$$

El polinomio  $Q(T) = 2.3 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 - 5.2 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0.00075 \cdot T^2 + 0.43T^4 + 76$  se obtiene manteniendo la presión constante ( $P = 308000$  Pa), cuya gráfica se muestra en la Figura 9.1. El valor de  $k$  se obtiene manteniendo como constante la temperatura ( $T = 62^\circ\text{C}$ ) y la presión ( $P = 308$  KPa). Con estas previsiones, el valor que se obtenga de  $I_{mpp}$  será el de  $k$ , teniendo en cuenta que  $R(P) = -1.1123 \cdot 10^{-24} \cdot P^5 + 1.0932 \cdot 10^{-18} \cdot P^4 - 4.2525 \cdot 10^{-13} \cdot P^3 - 8.4666 \cdot 10^{-8} \cdot P^2 - 0.0088164 \cdot P + 441.72$ .



**Figura 9.1: Punto de corriente de máxima potencia en función de la temperatura**



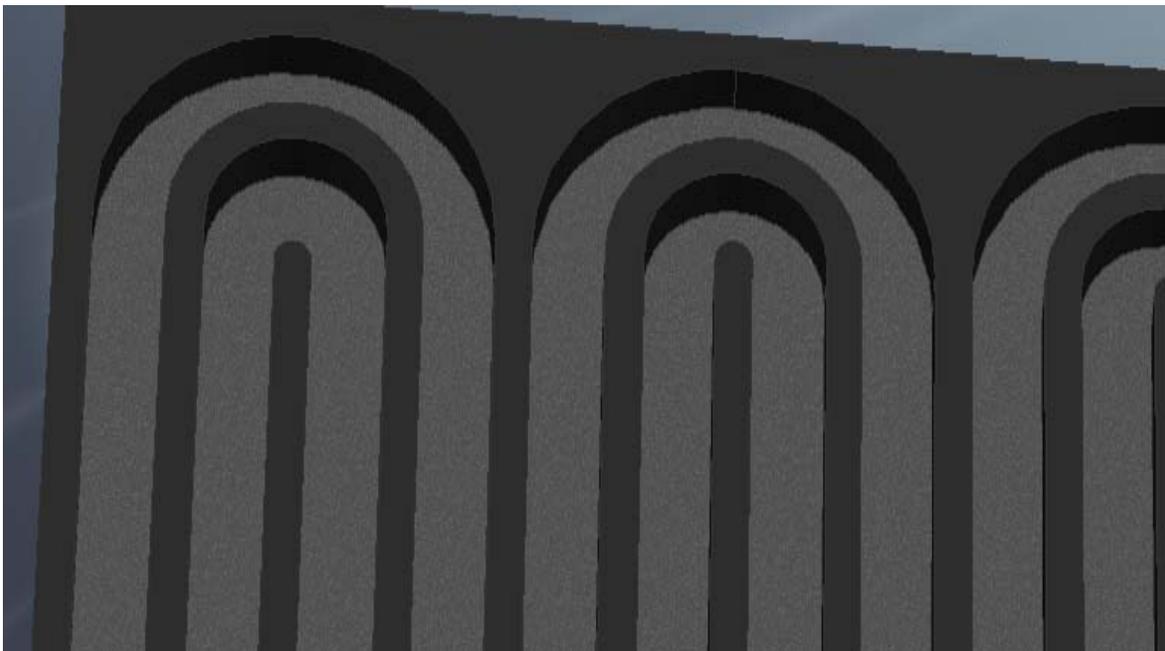
**Figura 9.2: La dependencia lineal que presenta la eficiencia en función del voltaje**

Claramente se aprecia que la temperatura es un factor muy importante para el funcionamiento de la pila de combustible, y de ello la importancia de erradicar el calor que produce la reacción química dentro de la pila, de manera concreta en el catalizador. Este calor puede eliminarse de la pila mediante un disipador de calor que logre mantenerla a la temperatura indicada. De acuerdo con la figura 9.2, se puede comprobar utilizando el modelo de  $V$  vs  $I$ , aprovechando su linealidad entre estas dos variables, que la eficiencia de la pila de combustible se ve beneficiada con un 85%.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO PROPUESTO

### 3.1 Diseño del disipador

Para poder obtener una geometría aceptable para nuestro propósito térmico se tuvo que recurrir a los experimentos que se han realizado con respecto al análisis de flujo computacional. Mediante este tipo de análisis se pudo concluir que, cuando se recurre al diseño del serpentín, la trayectoria del canal debe tener, en sus cambios de dirección del flujo, curvas suaves (figura 10) para eliminar las caídas excesivas de presión, que es muy importante cuidar para no alterar de manera importante el desempeño de la pila.



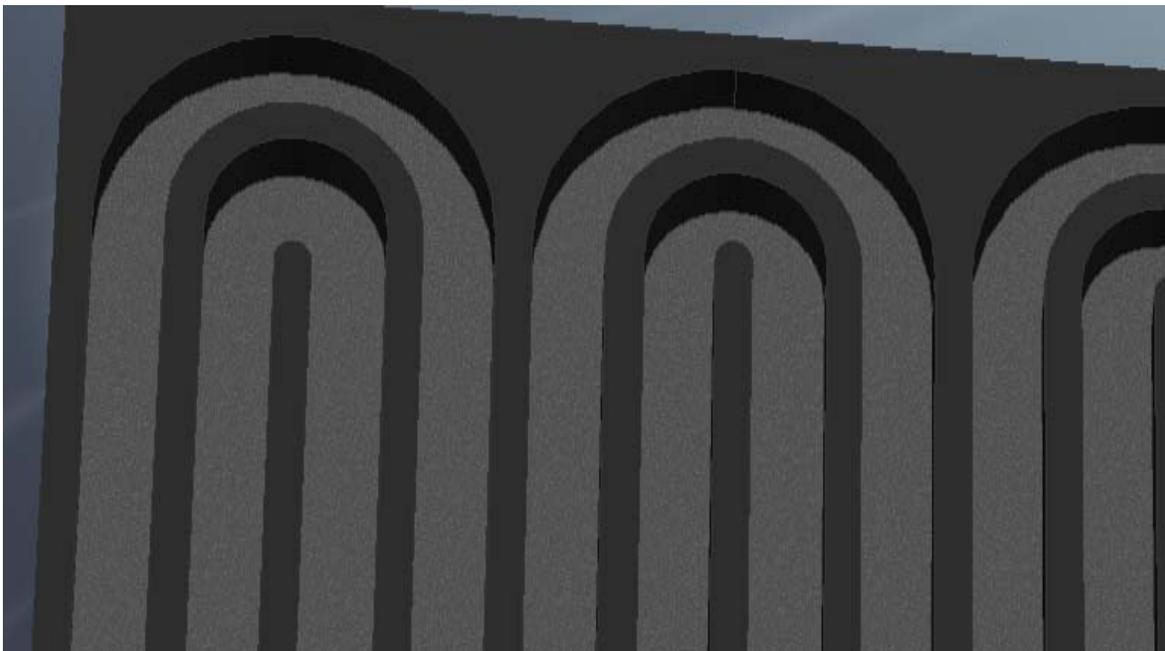
**Figura 10: Los cambios de dirección del flujo son graduales debido a las secciones semicirculares que presenta la trayectoria del serpentín.**

Claramente se aprecia que la temperatura es un factor muy importante para el funcionamiento de la pila de combustible, y de ello la importancia de erradicar el calor que produce la reacción química dentro de la pila, de manera concreta en el catalizador. Este calor puede eliminarse de la pila mediante un disipador de calor que logre mantenerla a la temperatura indicada. De acuerdo con la figura 9.2, se puede comprobar utilizando el modelo de  $V$  vs  $I$ , aprovechando su linealidad entre estas dos variables, que la eficiencia de la pila de combustible se ve beneficiada con un 85%.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO PROPUESTO

### 3.1 Diseño del disipador

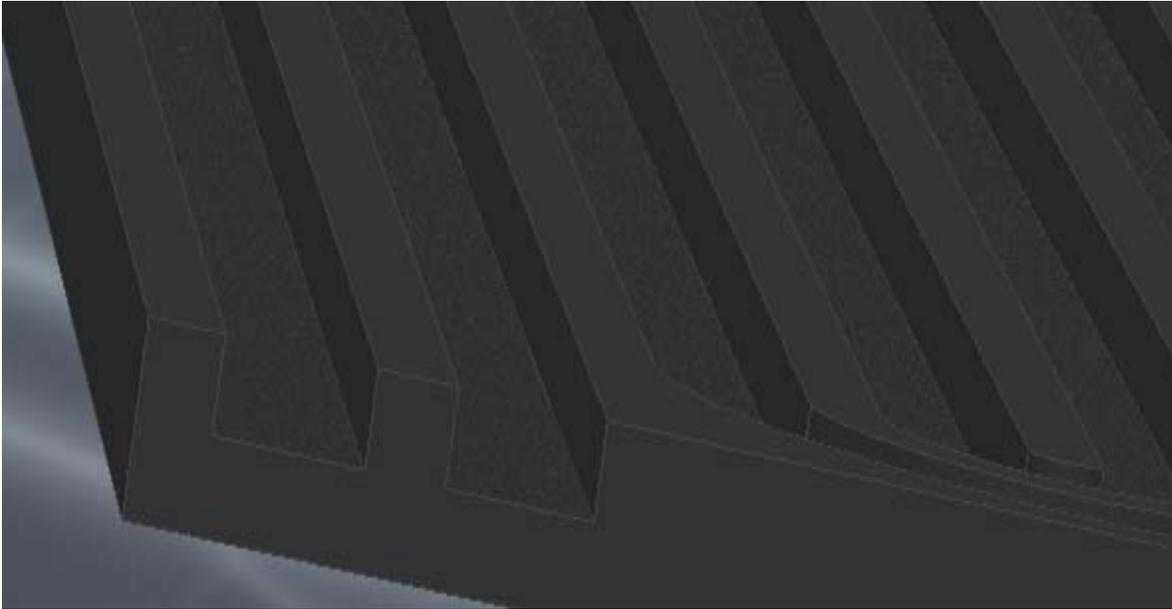
Para poder obtener una geometría aceptable para nuestro propósito térmico se tuvo que recurrir a los experimentos que se han realizado con respecto al análisis de flujo computacional. Mediante este tipo de análisis se pudo concluir que, cuando se recurre al diseño del serpentín, la trayectoria del canal debe tener, en sus cambios de dirección del flujo, curvas suaves (figura 10) para eliminar las caídas excesivas de presión, que es muy importante cuidar para no alterar de manera importante el desempeño de la pila.



**Figura 10: Los cambios de dirección del flujo son graduales debido a las secciones semicirculares que presenta la trayectoria del serpentín.**

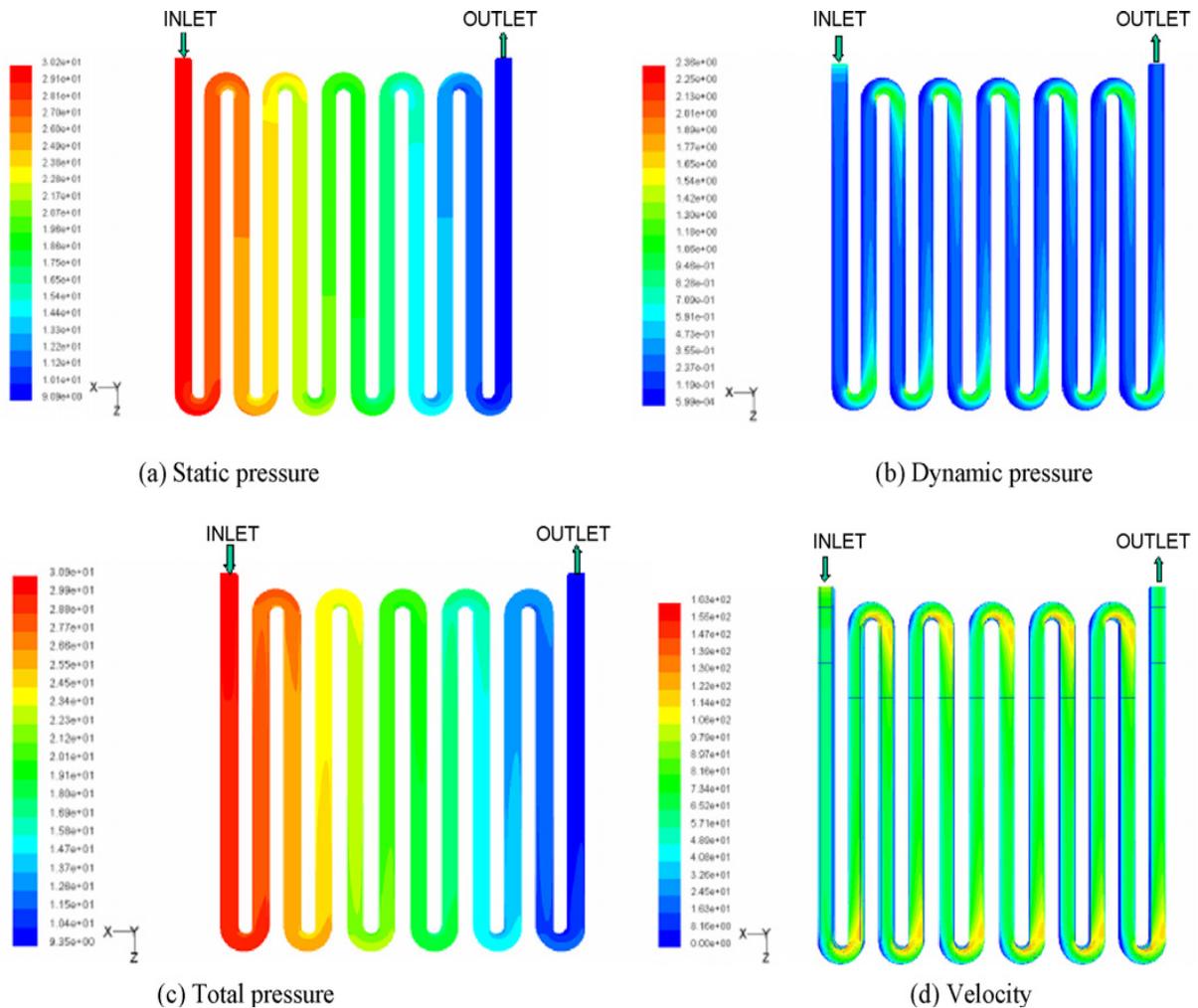
También se llega a la conclusión, en términos de transferencia de calor, que la geometría de las paredes del serpentín (figura 11) tienen que ser rectangulares, tomando en cuenta que esta forma permite mayor transferencia de calor.

Por lo antes mencionado y con base en la Figura 12 el diseño presenta características bastante aceptables para la dinámica del fluido que se desplazará a lo largo del serpentín.



**Figura 11: Detalle sobre la geometría que presenta el canal.**

La Figura 12 revela que las caídas de presión y velocidad se presentan en la parte de los codos. Esto podría deberse a que al momento de que las líneas de corriente terminan la mitad de trayectoria circular se desprenden de las paredes y se impactan con las paralelas a su trayectoria, formando vórtices en esa zona, lo que da lugar a fluctuaciones en presión y temperatura.



**Figura 12: Análisis con la técnica de flujo computacional a través de serpentin**

En este caso, para el disipador de calor, se tiene doble canal ya que otra conclusión que se obtiene del análisis del flujo computacional es que cuando se tiene un serpentin con doble canal se incrementa el área de contacto superficial y por lo tanto se incrementa la transferencia de calor, además de una disminución de caídas de presión y velocidad.

## 3.2 Selección de materiales

Se propone recurrir a los materiales compuestos del tipo carbono-carbono, es decir, que presentan una matriz de carbono con refuerzos de carbono. Se caracterizan por ser ligeros y a la vez densos, con altas prestaciones mecánicas, alta resistencia térmica y muy inertes ante la mayoría de agentes químicos.

Para la matriz de carbón se utilizará el grafito pirolítico, siendo éste un buen candidato ya que posee muy buenas características térmicas gracias a su alta naturaleza anisótropa (capacidad de presentar diferentes propiedades dependiendo en la dirección que se mida), en la cuestión térmica la conductividad es diferente en distintas direcciones. A lo largo del plano basal presenta una conductividad alrededor de los  $600$  a  $800 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Otra ventaja muy importante es que presenta una densidad suficientemente elevada, de  $2.27 \text{ g cm}^{-3}$ .

Como refuerzo se proponen partículas de diamante sintético, para aumentar el coeficiente de conductividad térmica y de esta manera disipar la mayor cantidad de calor posible. En este trabajo se da por hecho que el valor de la temperatura a la que se debe mantener la pila es alrededor de  $62^\circ\text{C}$  por lo que se debe tener cuidado con la fracción en volumen de partículas de diamante ya que este material posee una conductividad térmica de  $2000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y una densidad de  $3.515 \text{ g cm}^{-3}$ .

De acuerdo con el material compuesto propuesto y mediante la regla de las mezclas, se toma un 20% de partículas de diamante sintético, presenta las siguientes características:

---

### COMPUESTO

---

Densidad	$2.46 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Conductividad	$960 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Cp	$669.8 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

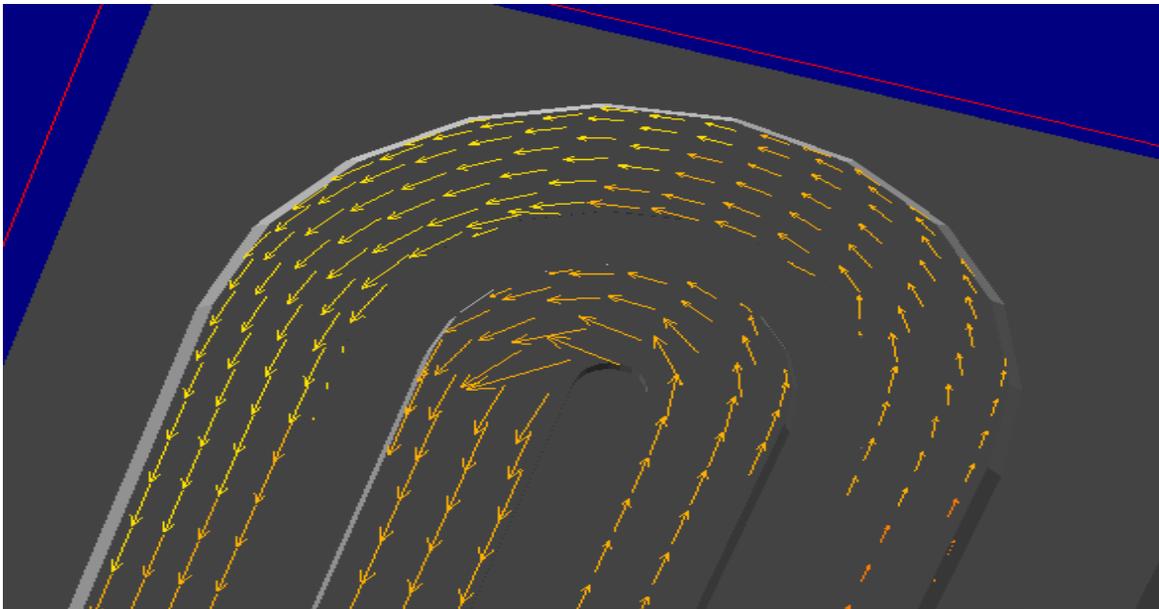
---

# CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

## 4.1. Simulación utilizando PHOENICS

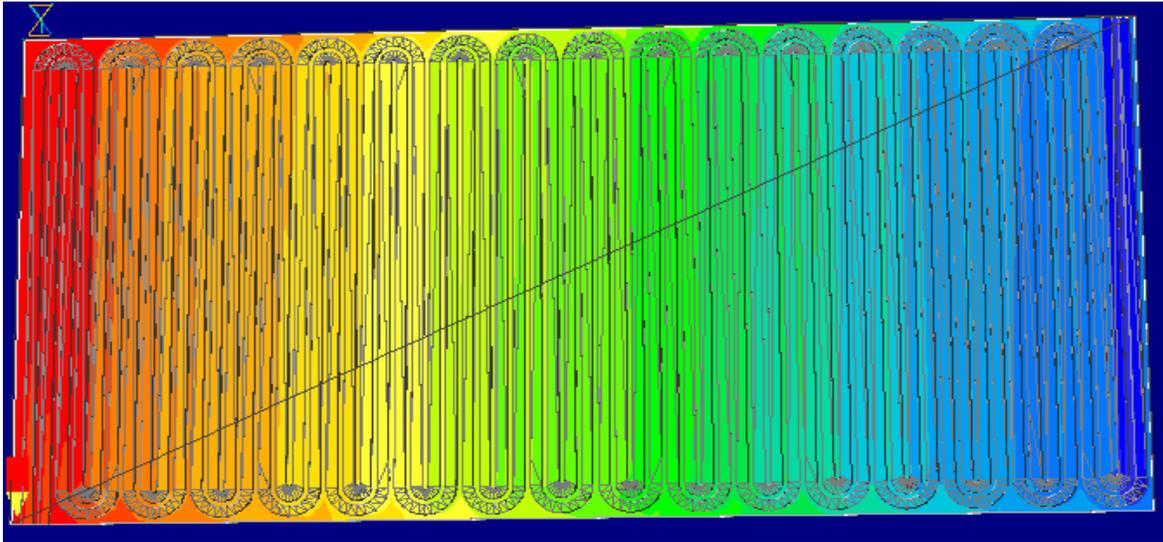
Phoenics ayuda a los arquitectos, los ingenieros de diseño y los oficiales de seguridad relacionadas con el desempeño de los sistemas de aire de flujo para el medio ambiente construido. Permite a los usuarios visualizar, entender, evaluar y perfeccionar los patrones de flujo de aire. Se puede utilizar el modelo de salas limpias, quirófanos, centros deportivos, aparcamientos, los túneles viales y ferroviarios, los entornos industriales y desarrollos residenciales.

En este trabajo se utiliza PHOENICS para simular la transferencia de calor y lograr establecer la mecánica térmica del dissipador, de acuerdo a la geometría que se muestra en la Figura 7 y partiendo de la Figura 12, se observa que en las zonas donde el fluido cambia de dirección se generan vórtices (Figura 13).

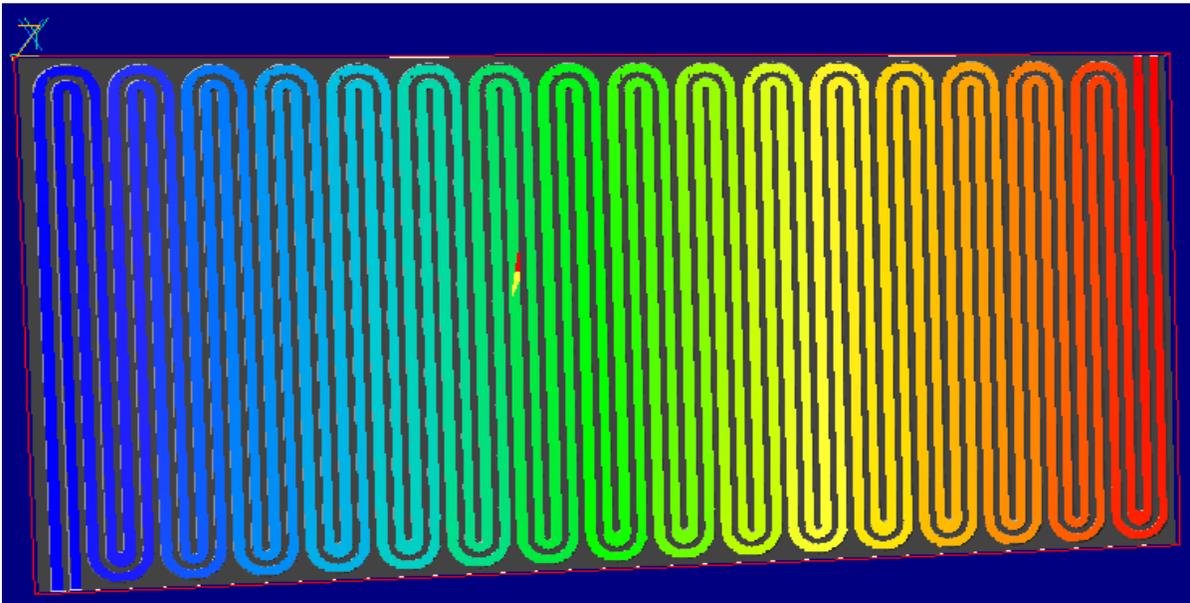


**Figura 13: COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO AL DESPLAZARSE EN UN ACCESORIO SEMICIRCULAR**

En la Figura 14 podemos observar como el aire adquiere una distribución de temperaturas, de tal manera que los matices que se muestran, los colores principales a tomar son el azul que es la temperatura de entrada y el rojo la temperatura de salida. En cuestión de distribución de presiones podemos observar (Figura 15) que existe un patrón de comportamiento, en cada dos vueltas la presión cae.



**Figura 14: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE A LO LARGO DEL SERPENTÍN**



**Figura 15: DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN A LO LARGO DEL SERPENTÍN**

## Capítulo 5. RESULTADOS

### 5.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados del análisis, realizados a la pila de combustible tipo PEM, se concluye que el disipador de calor, diseñado con un material compuesto del tipo carbono-carbono, es candidato idóneo para maximizar la eficiencia de la pila de combustible debido, principalmente, a sus propiedades térmicas, sin dejar de considerar que se trata de un material ligero, flexible, resistente al calor y fácilmente de ensamblar en la pila.

Por medio del comportamiento de la pila de combustible, a través de su curva de polarización V vs I, se logró deducir que la temperatura de operación a la cual debe trabajar la PEMFC es a 62°C, dicha temperatura hará que la pila entregue una potencia de 1640 W al trabajar con una eficiencia del 85 %.

El diseño del disipador, desde el punto de vista geométrico, presenta ligeras caídas de velocidad y presión en las secciones semicirculares a lo largo de la trayectoria del serpentín, siendo las zonas donde se tiene mayor temperatura debido a la generación de vórtices, provocando el estancamiento de la evacuación del calor absorbido por el material compuesto.

Por medio de las imágenes que obtenemos de PHOENICS nos podemos dar cuenta del comportamiento del aire dentro de nuestro intercambiador de calor, notamos que el fluido, adquiere una distribución de temperatura dándonos a entender que entra con una temperatura de 20 °C y sale con una de 81 °C, logrando de esta manera mantener la temperatura en la base del disipador de T=62°C.

## 5.2. Recomendaciones

Las principales recomendaciones que se pueden elaborar, para ser tomadas en cuenta en trabajos futuros relacionados con la optimización del diseño de las celdas de combustible, son:

- a. Al mantener la pila de combustible bajo condiciones de temperaturas relativamente bajas ( $T=62^{\circ}\text{C}$ ) y suministrando hidrógeno proveniente de hidrocarburos, la producción de CO supera el porcentaje en partes por millón que tolera el electro-catalizador. La estructura del electro-catalizador es constituida en gran parte por platino (Pt), elemento vulnerable ante la presencia de partículas de CO, siendo esto una desventaja para el desempeño de la pila de combustible. Para dicha situación, se recomienda proponer materiales o aleaciones diferentes para el electro-catalizador, una opción podría ser carbón de alta superficie específica para poder reducir la carga de platino en dicho componente.
- b. A una temperatura de  $62^{\circ}\text{C}$  se garantiza la humedad a la que debe estar inmerso el electrolito, aun así se recomienda que la investigación se enfoque en buscar alternativas para mejorar su conducción iónica incrementando de esta manera la eficiencia de la celda y por ende la eficiencia de la pila de combustible.
- c. Las imágenes que se muestran en este trabajo, provenientes de simulaciones utilizando PHOENICS, tienen como objetivo ilustrar la mecánica térmica del disipador, sin embargo hacen falta consideraciones específicas, haciendo uso de la técnica en análisis de flujo computacional, para poder entender en lo absoluto el comportamiento del disipador.

# Bibliografía

## LIBROS

- INCROPERA, Frank. Flujo interno, Intercambiadores de calor. En: Fundamentos de Transferencia de Calor. Edición 4. Medellín, Antioquia, PEARSON, 1999.

## ARTÍCULOS DE REVISTAS ELECTRÓNICAS

- RAJESH Boddu, UDAY Kumar Marupakula, PRADIP Majumdar. Development of bipolar plates with different flow channel configurations for fuel cells. Elsevier [en línea]. 22 January 2009. [fecha de consulta: 3 Agosto 2009 ]. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/jpowsour](http://www.elsevier.com/locate/jpowsour)
- SANGSEOK Yu, DOHOY Jung. Thermal management strategy for a proton exchange membrane fuel cell system with a large active cell area. Elsevier [en línea]. 18 February 2008. [fecha de consulta: 22 Agosto 2009 ]. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)

## Boletines

- Infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso.[en línea]. montreal, Canadá. innovation forecast of fuel cells. *georgia tech technology policy & assessment center*, abril, 1998. [fecha de consulta: 24 agosto 2009]. disponible en: <http://www.iie.org.mx/bolea00/tenden01.pdf>.
- La economía del hidrógeno aplicaciones convencionales del hidrógeno y pilas de combustible. [en línea]. universidad rey juan carlos, c/ tulipán s/n, 28933. grupo de ingeniería química y ambiental. escuela superior de ciencias experimentales y tecnología (escet), 2005. [fecha de consulta: 24 agosto 2009]. disponible en: [www.stirlingengine.com](http://www.stirlingengine.com)
- Energías renovables: “celdas de combustibles”. [en línea]. universidad de chile, 28 de abril de 2004. departamento de ingeniería eléctrica.[fecha de consulta 27 agosto]. disponible en: [http://www.uchile.cl/uchile.portal?\\_nfpb=true&\\_pagelabel=not&url=32284](http://www.uchile.cl/uchile.portal?_nfpb=true&_pagelabel=not&url=32284)

## Sitios de internet

- Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE:  
<http://www.iie.org.mx/bolEA00/tenden01.pdf>
- <http://www.oviedo.es/personales/carbon/grafito%20y%20fibras/fibras%20de%20carbono.htm>
- **SPI Supplies**®: <http://www.2spi.com.mx/catalog/new/hogsub.shtml>
- [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/viladoms\\_w\\_jj/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/viladoms_w_jj/capitulo1.pdf)
- [http://fain.uncoma.edu.ar/prof\\_tec/mecanic/termodin/fundame\\_calor.pdf](http://fain.uncoma.edu.ar/prof_tec/mecanic/termodin/fundame_calor.pdf)
- [http://biocab.org/Transferencia\\_Calor.html](http://biocab.org/Transferencia_Calor.html)
- <http://www.iie.org.mx/bolEA00/tenden01.pdf>
- <http://www.aurova.ua.es:8080/ja2005/comu/3971-Sistema%20de%20control%20para%20la%20operaci%F3n%20id%F3nea%20de%20una%20pila%20de%85.pdf>
- [http://www.technologyreview.com/es/read\\_article.aspx?id=786](http://www.technologyreview.com/es/read_article.aspx?id=786)