

## SIMULACIÓN DE FLUJO GASEOSO EN PLACA BIPOLAR DE CELDA PEMFC

**Gerardo M. Imbrioscia<sup>a,b</sup>, María J. Lavorante<sup>a</sup>, Juan I. Franco<sup>a</sup>, Héctor J. Fasoli<sup>a</sup>,  
Pablo Ristori<sup>c</sup>, Elvio Heindenreich<sup>d</sup>**

<sup>a</sup>*Departamento de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (CITEDEF-EST), San Juan B. de La Salle 4397, B1603ALO, Villa Marteli, Provincia de Buenos Aires, Argentina, jfranco@citedef.gob.ar*

<sup>b</sup>*Departamento de Investigación Escuela Superior Técnica "Manuel N. Savio" (EST), Cabildo 15, C.A.B.A., Argentina, gmimbrioscia@gmail.com.*

<sup>c</sup>*CEILAP (CONICET-CITEDEF), División Lidar, San Juan B. de La Salle 4397, B1603ALO, Villa Marteli, Provincia de Buenos Aires, Argentina.*

<sup>d</sup>*Departamento de Propulsión (CITEDEF).*

**Palabras Clave:** Placa Bipolar, Hidrógeno, Simulación, Pila a combustible hidrogeno.

**Resumen.** Las placas bipolares, elementos constitutivos de las pilas a combustible PEM, poseen en sus caras canales para la circulación de los gases. Los canales se presentan en distintos tipos de geometrías, siendo nuestro caso puntual de estudio las de tipo "recto/paralelo". Las funciones claves que cumplen estas placas son: distribuir el combustible y el comburente dentro de la celda y evitar su mezcla, conducir la corriente eléctrica fuera de la celda, facilitar el drenaje del agua formada dentro y fuera de la celda y transmitir el calor producido por los fenómenos irreversibles al exterior.

En el presente trabajo se procedió a la generación de un modelo 3D de la geometría de las placas utilizadas en nuestro laboratorio, valiéndonos de un programa de diseño asistido por computadora (Solid Edge). Posteriormente se realizó por medio del software OpenFOAM la simulación del flujo de hidrógeno a través de los canales; obteniendo así valores de presiones y velocidades.

Se generaron dos modelos matemáticos simplificados basados en las condiciones geométricas que controlan las variables de presión y velocidad. Los modelos fueron utilizados para verificar los resultados obtenidos en nuestra simulación. Estableciendo un estado estacionario para el estudio, se encontraron zonas de baja velocidad como producto de pequeñas áreas de paso. Esto también se pudo identificar en los modelos matemáticos, donde a través de un análisis de sus ecuaciones se encontró que las responsables de este fenómeno eran las variables que definían las áreas de paso.

Como consecuencia se propusieron cambios en la geometría, de implementación sencilla que permitirán incrementar el desempeño de la pila de combustible.

Por otro lado, se logró obtener un sistema (simulación-modelos) de auto-validación que servirá para futuros análisis.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para un conjunto de membrana /electrodo dado, la densidad de potencia de un *stack* de pila de combustible puede ser incrementada considerablemente reduciendo el perfil de las placas bipolares. Un prerrequisito fundamental para la mayoría de las aplicaciones de potencia es la producción de pilas PEMFC compactas y livianas, lo cual se logra con una selección apropiada de materiales. El diseño de las placas bipolares en su totalidad, y los canales de flujo en particular, son áreas potenciales de investigación para llevar esta alternativa de energía limpia a ser utilizable en distintos ámbitos.

Las placas bipolares, elementos constitutivos de las celdas PEM, poseen en sus caras canales para la circulación de los gases. Los canales se presentan en distintos tipos de geometrías, siendo nuestro caso puntual de estudio las de tipo "recto/paralelo". Las funciones claves que cumplen estas placas son: distribuir el combustible y el comburente dentro de la celda evitando también su mezcla, conducir la corriente eléctrica fuera de la celda, facilitar el drenaje del agua formada dentro como producto de reacción y eliminándola al exterior de la celda y transmitir el calor producido por las reacciones electroquímicas al exterior. A continuación se muestra en la [figura 1](#) una placa bipolar utilizada en el Laboratorio LAB-PEM.

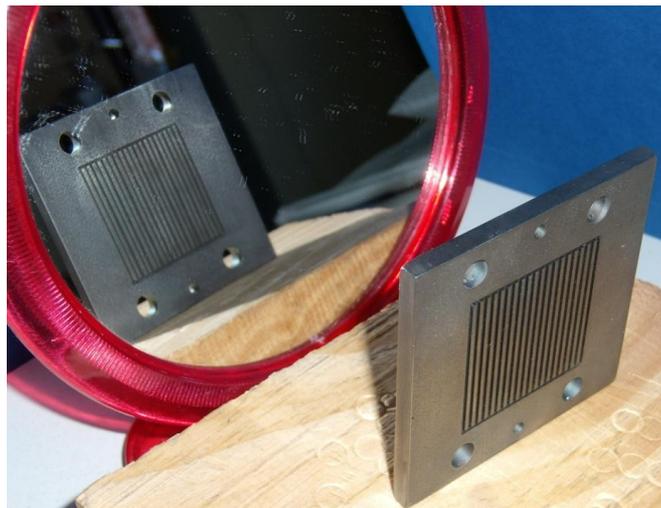


Figura.1 Placa bipolar utilizada en el LAB-PEM

El propósito de este trabajo es el estudio del comportamiento del hidrógeno en la geometría determinada, autovalidando a su vez un sistema de simulación compuesto de la tecnología CFD y modelos matemáticos.

## 2. DESARROLLO DEL TRABAJO

### 2.1 Simulación a través de CFD

Se realizó un análisis dimensional y se generó un archivo CAD (del inglés Computed Assisted Design) a partir de un prototipo real de placa bipolar construido en el laboratorio. En la [figura 2](#) se muestran esquemas de las divisiones físicas más importantes a tratarse en el presente trabajo.

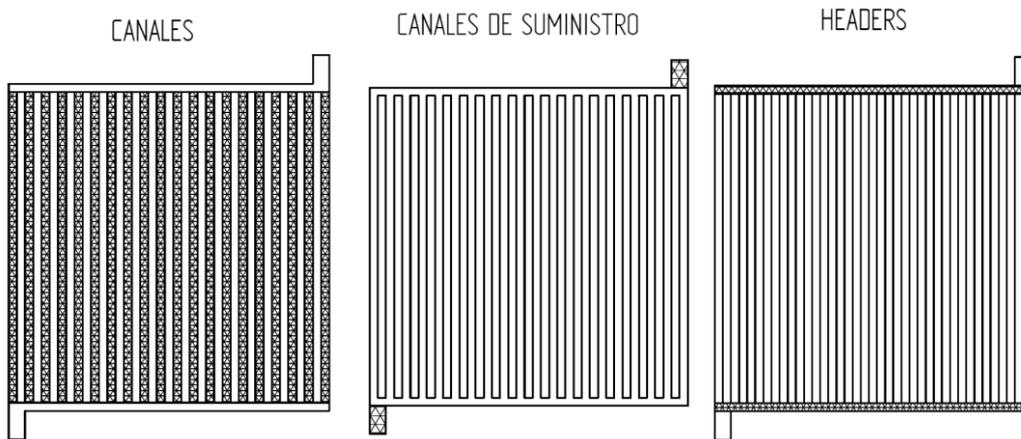


Figura.2 Divisiones físicas

Luego se procedió al mallado de la pieza para obtener un archivo que contenga todos los vértices de la geometría. Estos puntos son requeridos por el CFD OpenFOAM, en el cual se regenera la geometría y se produce el mallado de la misma, como se observa en la [fig.3](#).

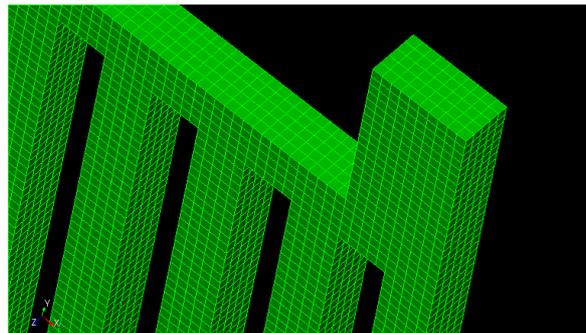


Figura.3 Detalle de geometría final

Las condiciones de borde impuestas en la simulación fueron producto de la medición de la presión y caudal de trabajo de un prototipo de pila perteneciente a nuestro laboratorio, a la temperatura a la cual se llevaron a cabo estas mediciones fue de 27°C. Según los trabajos estudiados [[1 - 3](#)] se establecieron las siguientes premisas:

- No se aplican las ecuaciones de Darcy, lo cual indica que no existe transporte de masa entre los canales de flujo y el GDL (del inglés Gas Diffusion Layer); por lo cual éste último se suprime del modelo.
- No hay transmisión de calor entre las paredes de los canales y el exterior; el modelo es adiabático.
- El gas utilizado es hidrógeno en fase gaseosa; no se analiza la existencia de agua en ninguno de sus estados.
- El número de Reynolds es menor a 1000, por lo que el flujo es laminar.
- El flujo es incompresible.
- El sentido de circulación del gas es tipo Z, lo que indica que los canales de suministro se encuentran en posiciones opuestas.

## 2.2 Estimaciones en base a correlaciones empíricas y modelos simplificados

Basado en los trabajos de Maharudrayya et al.(2005) y Weigang Zhang et al.(2009) se procedió a la generación de dos modelos matemáticos, los cuales permiten obtener un mapa de velocidades basados en variables geométricas y condiciones iniciales mostradas en la tabla 1.

<b>Variables geométricas</b>		
Ancho del header	$W_h = 1*10^{-3}$	[m]
Ancho del "rib"	$W_r = 1*10^{-3}$	[m]
Ancho del canal	$W_c = 1*10^{-3}$	[m]
Largo del header	$L_h = 39*10^{-3}$	[m]
Largo del canal	$L_c = 38*10^{-3}$	[m]
Profundidad del header	$d_h = 1*10^{-3}$	[m]
Profundidad del canal	$d_c = 1*10^{-3}$	[m]
Cantidad de canales	$N = 20$	
Diametro hidráulico del canal	$D_c = 1*10^{-3}$	[m]
Diametro hidráulico del header	$D_h = 1*10^{-3}$	[m]
Área de sección del canal	$A_c = 7.85*10^{-7}$	[m <sup>2</sup> ]
Área de sección del header	$A_h = 7.85*10^{-7}$	[m <sup>2</sup> ]
<b>Variables iniciales</b>		
Caudal de entrada	$Q_{in} = 6.366*10^{-6}$	[m <sup>3</sup> /s]
Densidad	$\rho = 0.079128$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Viscosidad absoluta	$\mu = 8.95*10^{-6}$	[kg/ms]

Tabla 1. Variables geométricas e iniciales

Mediante el uso del software MATLAB, se introdujeron los modelos según las ecuaciones de los autores y utilizando los valores de la tabla precedente se llegaron a los siguientes resultados:

### *Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells (Maharudrayya, 2005)*

Correlación empírica de Kays & Crawford

Para el canal:

$$(\text{Re}f)_c = 13.84 + 10.38 * e^{\left(-3.4 \frac{dc}{Wc}\right)} = 14.1864 \quad (1)$$

Para el header:

$$(\text{Re}f)_h = 13.84 + 10.38 * e^{\left(-3.4 \frac{dc}{Wc}\right)} = 14.1864 \quad (2)$$

Velocidad de entrada

$$V_{in} = \frac{Q_{in}}{A_h} = 8.1054 [m/s] \quad (3)$$

Constantes adimensionales

$$K_1 = K_{11} * K_{12} * K_{13} * K_{14} \quad (4)$$

$$K_1 = \left( \frac{N * A_c}{A_h} \right) * \left( \frac{\rho * V_{in} * D_c}{\mu} \right) * \left( \frac{D_c}{2 * L_c} \right) * \left( \frac{1}{(Re f)_c} \right)$$

$$K_1 = 20 * 71.6612 * 0.014286 * 0.07049 = 1.4433 \quad (5)$$

$$K_2 = K_{21} * K_{22} * K_{23} \quad (6)$$

$$K_2 = \left( \frac{\mu}{\rho * V_{in} * D_h} \right) * \left( \frac{2 * L_h}{D_h} \right) * \left( \frac{D_c}{2 * L_c} \right) * (Re f)_h$$

$$K_2 = 0.013955 * 78 * 14.1864 = 15.4413 \quad (7)$$

$$m = K_1 + \sqrt{K_1^2 + 2K_1K_2} = 8.2737 \quad (8)$$

$$n = K_1 - \sqrt{K_1^2 + 2K_1K_2} = -5.3871 \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{0.5 * (1 + e^n)}{e^n - e^m} = -0.00012816 \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{0.5 * (1 + e^m)}{e^m - e^n} = 0.50013 \quad (11)$$

Flujo másico relativo en los canales

$$m'_c = \left[ \frac{c_1 * m * e^{(mx)} + c_2 * n * e^{(nx)}}{N} \right] \quad (12)$$

Parámetro de uniformidad de flujo

$$F_1 = \frac{m'_{cMAX} - m'_{cMIN}}{m'_{cMAX}} = 0.94259 \quad (13)$$

$$F_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (m'_c{}^i - \overline{m'_c})^2}}{N * \overline{m'_c}} = 0.2717 \quad (14)$$

***Analysis and optimization of flow distribution in parallel-channel configurations for proton exchange membrane fuel cells, (Zhang, 2009)***

En el presente trabajo, los autores realizaron una analogía entre los canales de una placa bipolar y un circuito eléctrico, donde:

Corriente = velocidad

Resistencia = resistencia de los canales

Tensión = presión

Resistencia fluidica de los canales

$$r = \frac{(\text{Re}f)_c * \mu * (W_c + d_c) * L_c}{D_c * A_c} = 11.3163 [\text{kg} * \text{m}^2 / \text{s}] \quad (15)$$

Resistencia fluidica de los headers

$$R = \frac{(\text{Re}f)_h * \mu * (W_h + d_h) * W_r}{D_h * A_h} = 0.32332 [\text{kg} * \text{m}^2 / \text{s}] \quad (16)$$

$$M_{(N)} = R_{(N)} * V_{(N)} \quad (17)$$

Para resolver la ecuación 17; y a partir de los valores obtenidos de las ecuaciones 15 y 16, más los indicados en la Tabla 1 se confeccionaron las siguientes matrices:

Matriz de resistencias

$$R_{(N)} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} \\ R_{12} & R_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Resistencias de los canales

$$R_{11((N-1) \times N)} = \begin{bmatrix} r_1 & -r_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & -r_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & -r_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{N-1} & -r_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

Resistencias de los headers

$$R_{12((N-1) \times (N-1))} = \begin{bmatrix} -(R_{1in} + R_{1out}) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -(R_{2in} + R_{2out}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(R_{(N-1)in} + R_{(N-1)out}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Áreas de los canales

$$R_{21(N \times N)} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_N \end{bmatrix} \quad (21)$$

Áreas de los headers

$$R_{22(N \times (N-1))} = \begin{bmatrix} A_h & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -A_h & A_h & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -A_h & A_h & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -A_h & A_h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -A_h \end{bmatrix} \quad (22)$$

El vector M contiene la condición de borde del problema, léase la velocidad de entrada.

$$M_{(N)} = \begin{bmatrix} -V_{in} * R_1 \\ -V_{in} * R_2 \\ \vdots \\ -V_{in} * R_{(N-1)} \\ V_{in} * A_h \\ \left. \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \right\} \\ N-1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

El vector V contiene las magnitudes incógnitas del problema, las cuales son la velocidad del flujo en los canales y a lo largo del *header*.

$$V_{(N)} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{N-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Factor de no-uniformidad del flujo

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}}{N * \bar{v}} = 0.12364 \quad (25)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1 Factor o coeficiente de no uniformidad

Según los valores obtenidos, se encuentra una diferencia de 0.148 entre los resultados obtenidos de las ecuaciones (14) y (25); si bien ambos valores se encuentran cercanos al cero, en la bibliografía consultada estos se encuentran en el orden de la centésima.

Un análisis más exhaustivo sobre los valores elevados de (13) y (14) hace que volvamos hacia las ecuaciones (4) y (6) para verificar los valores que arrojaron las constantes que las componen. Según Maharudrayya et al. (2005),  $K_{11}$  debe ser del orden de 10,  $K_{12}$  del orden de 100,  $K_{13}$  cercano a 0.01 y  $K_{14}$  del orden de 0.05. Como resultado de esto,  $K_1$  debe estar cerca de 0.5. De la misma manera, para aplicaciones típicas de pilas de combustible,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$ , y  $K_{23}$  son del orden de 0.001, 100 y 20, respectivamente. Por ello,  $K_2$  típicamente es del orden de 2. De lo anteriormente expuesto, y realizando una comparación con los valores de nuestro modelo se observa que hay una diferencia marcada en la constante  $K_{11}$  que nos relaciona  $A_c$  con  $A_h$ , poniendo el foco de atención en estas variables. Continuando el análisis con la ecuación (6), el valor de referencia oscila  $1 < K_2 < 10$ , siendo nuestro valor de aproximadamente 15; dentro de la ecuación mociónada vemos que la constante  $K_{21}$  se encuentra marcadamente por encima de la referencia para la misma, y evaluando las variables

que la componen, apartando las características del gas, vemos que en el denominador se encuentra  $D_h$ .

Como resultado podemos señalar que las dimensiones del *header* deben ser revisadas en pos de un aumento para poder acercar las constantes calculadas al valor de referencia.

### 3.2 Análisis de las velocidades dentro de los canales

Como se puede observar de la comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos, hay una gran congruencia en el patrón de la curva de velocidades (figuras 4 y 6), la cual toma una forma de campana invertida con su mínimo en el sector de los canales centrales y la de caudal másico relativo, que se diferencia de la anterior solamente por un factor de escala (figura 5). Esto es congruente con lo publicado por Maharudrayya et al. (2005), donde indica que los últimos canales reciben el mayor caudal; y el mínimo se encuentra en el centro.

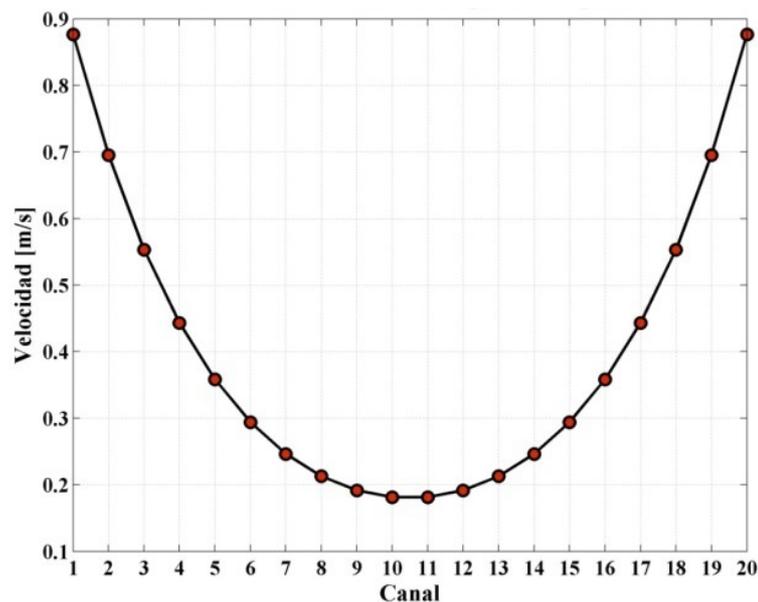


Figura.4 Velocidad en los canales según modelo basado en ecuaciones de Zhang

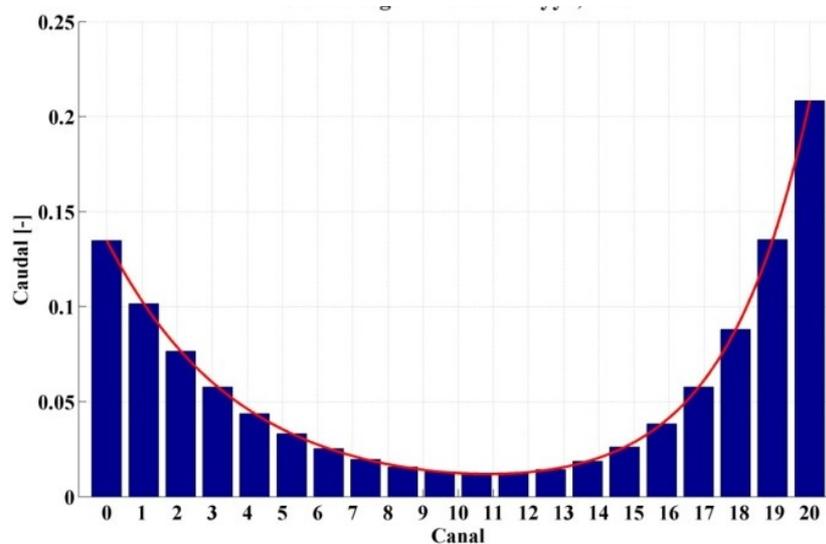


Figura.5 Caudal relativo en los canales según modelo basado en ecuaciones de Maharudrayya

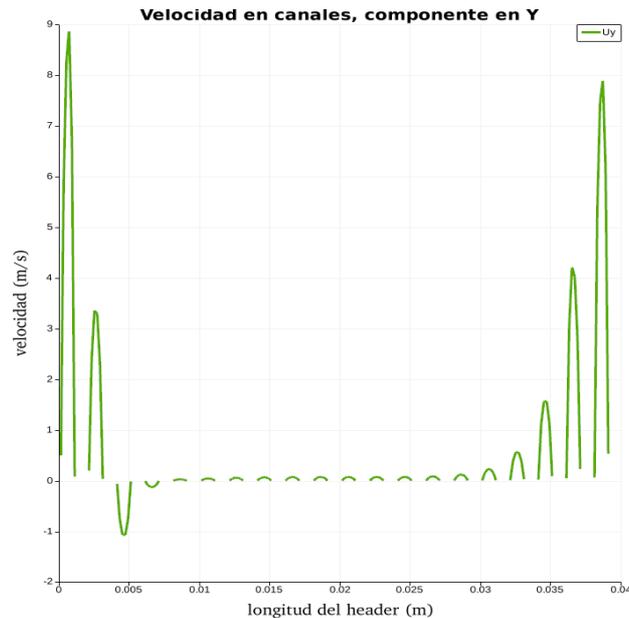


Figura.6 Velocidad en los canales a partir del modelo en OpenFOAM

### 3.3 Singularidad en el mapa de velocidades

Durante el desarrollo de la simulación en el OpenFOAM, se observó un fenómeno no esperado en el canal número 3. El flujo del gas, que debería ir desde la entrada a la salida en la totalidad de los canales, retrocede y vuelve al *header* de entrada.

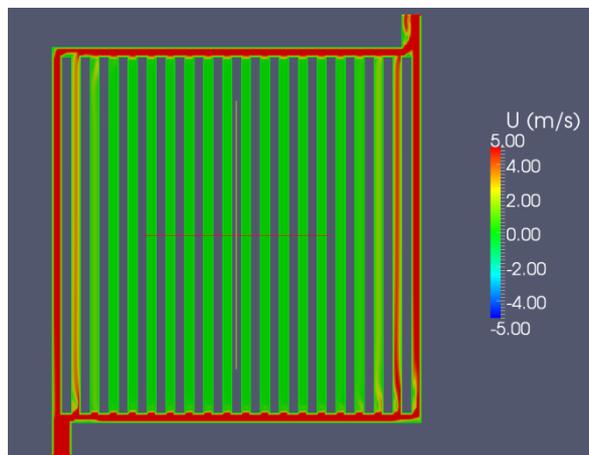


Figura.7 Velocidad en los canales a partir del modelo en OpenFOAM

En la figura de arriba (7) se ve claramente como se producen pequeños desprendimientos desde el *header* de entrada por los canales, formando el flujo. Si nos detenemos en el tercer canal, se puede ver como ocurre el mismo efecto pero en sentido contrario.

De la misma manera se puede observar zonas de baja velocidad en los canales y en los *headers* producto del cambio de dirección de la corriente, generando pequeños vórtices propios de la geometría utilizada.

En lo que respecta al evento del flujo en contrasentido, se llegó a la conclusión de que es generado debido a que, ya que la diferencia de presión entre entrada y salida es tan baja,

ocurre una zona de sobrepresión gracias al rápido llenado del canal 1 y 2, lo cual impulsa al gas hacia abajo por el canal 3, estabilizándose a partir del canal 4.

#### 4. CONCLUSIONES

Como resultados de los análisis realizados se observa claramente que el diseño de placa bipolar de tipo recto/paralelo presenta una pobre distribución de flujo en los canales centrales, concentrándose en los 2 canales de los extremos. Además se encontró un fenómeno de reflujos en el tercer canal a partir de la entrada, en el cual el gas circula en sentido contrario al sentido general.

Para evitar el fenómeno del reflujos y colaborar con el aumento del caudal y la velocidad en los canales centrales se proponen los siguientes cambios en la geometría, en lo que respecta al *header*:

- Aumentar en ancho del *header* de 2 a 4 veces el ancho del canal.
- Variar la geometría del *header* en distintas formas, siendo la de entrada en forma opuesta a la de salida.
- Los canales de suministro/salida de los *headers* se ubicaran un forma horizontal evitando el pre-direccionamiento hacia los primeros canales
- Variar el ancho de los canales, en forma creciente desde los extremos hacia el centro de la placa bipolar.

Estas modificaciones forman parte de un trabajo en desarrollo.

#### 5. REFERENCIAS

- Guilin Hu, Jianren Fan, Song Chen, Yongjiang Liu, Kefa Cen; Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) with conventional and interdigitated flow fields; *Journal of Power Sources*, 136:1–9, 2004.
- M. Kays, M.E. Crawford, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- P.H. Oosthuizen, L. Sun, K.B. McAuley; The effect of channel-to-channel gas crossover on the pressure and temperature distribution in PEM fuel cell flow plates. *Applied Thermal Engineering*, 25: 1083–1096, 2005.
- S. Maharudrayya, S. Jayanti, A.P. Deshpande; Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells. *Journal of Power Sources*, 144: 94–106, 2005.
- Weigang Zhang, Peng Hu, Xinmin Lai, Linfa Peng; Analysis and optimization of flow distribution in parallel-channel configurations for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 194: 931–94, 2009.
- Wen Lai Huang, Qingshan Zhu; Flow distribution in U-type layers or stacks of planar fuel cells. *Journal of Power Sources*, 178: 353–362, 2008.