Anexo 3: Obtención de las curvas características de una pila de combustible mediante modelizado.

Se busca en este apartado conseguir una representación fidedigna de las curvas de polarización, así como la de potencia térmica y la de potencia eléctrica, de tal forma que con dichas curvas fuera posible utilizar el método anteriormente especificado para calcular el punto de funcionamiento. La obtención de expresiones analíticas (polinomios) que reproduzcan el funcionamiento de la pila puede resultar muy útil a la hora de llevar a cabo cálculos numéricos, además de para poder caracterizar una pila con el fin de simular su comportamiento.

Se plantea un para obtener dichas curvas un nuevo ensayo virtual, con el fin de obtener datos de la tensión, intensidad, potencia eléctrica, potencia térmica, rendimiento eléctrico y potencia del hidrógeno aportado, de tal manera que se varía gradualmente el valor de la carga conectada a la pila en el banco de ensayo virtual y se recogen los datos. El esquema de Simulink utilizado para dicho ensayo es el siguiente [Figura 97].

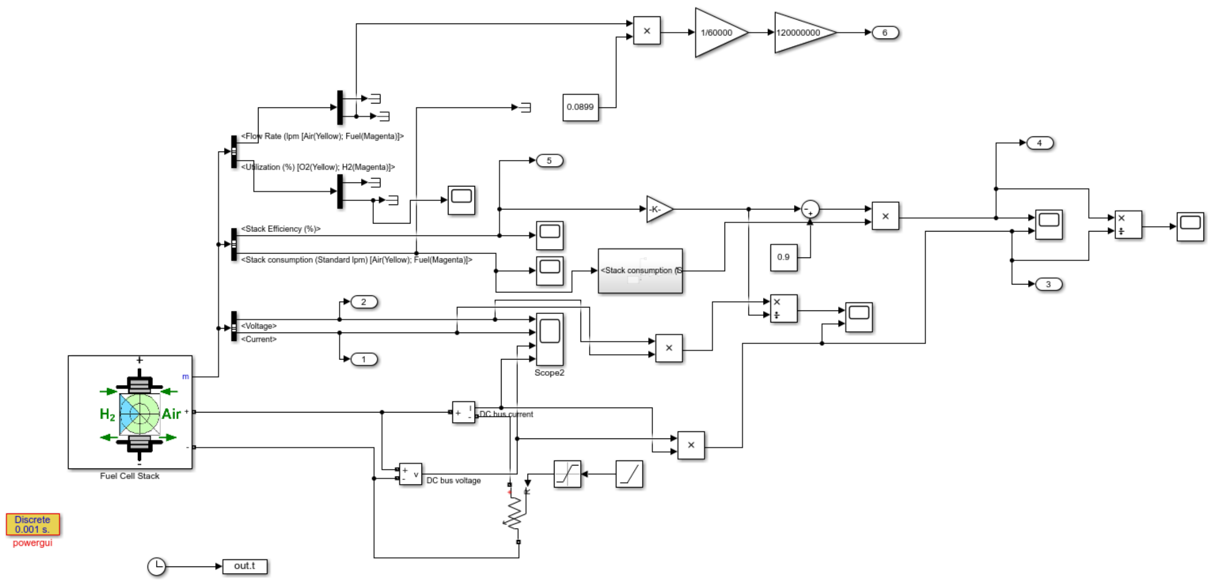

Figura 1. Ensayo de obtención de curvas carácterísticas.

Una vez finalizada la recepción de los datos se puede ajustar un polinomio de acuerdo con (MATLAB, 2020), en este caso de grado tres, que represente el comportamiento de cada curva. De esta forma el único parámetro que se omite es la dinámica de la pila, pero la reconstrucción de las curvas es adecuada. Para esta tarea, se emplea el siguiente código en Matlab [Figura 98].

```
t=[0:0.1:600];
Ens = sim('Ensayo_FuelCell_Curvas', t, [], []);

I=[Ens.yout{1}.Values.data];
V=[Ens.yout{2}.Values.data];
Pel=[Ens.yout{3}.Values.data];
Pter=[Ens.yout{4}.Values.data];
Rend=[Ens.yout{5}.Values.data];
PH2=[Ens.yout{6}.Values.data];

eje=linspace(0,220,2200);
g=3;

CVI=polyfit(I,V,g);
ErrorI=immse(V,polyval(CVI,I))
CVIe=polyval(CVI,eje);

CVP=polyfit(I,Pel,g);
ErrorP=immse(Pel,polyval(CVP,I))
CVPe=polyval(CVP,eje);

CVT=polyfit(I,Pter,g);
ErrorT=immse(Pter,polyval(CVT,I))
CVTe=polyval(CVT,eje);

CVR=polyfit(I,Rend,g);
ErrorR=immse(Rend,polyval(CVR,I))
CVRe=polyval(CVR,eje);

CVH=polyfit(I,PH2,g);
ErrorH=immse(PH2,polyval(CVH,I))
CVHe=polyval(CVH,eje);
```

Figura 2. Código de obtención de las curvas características de la pila de combustible.

Para comprobar si realmente las curvas polinómicas se ajustan a la situación real se comprueban los errores cuadráticos medios de dichas curvas, no llegando a superar en ningún caso un error del 2%

Finalmente se representan las curvas obtenidas [Figura 99].

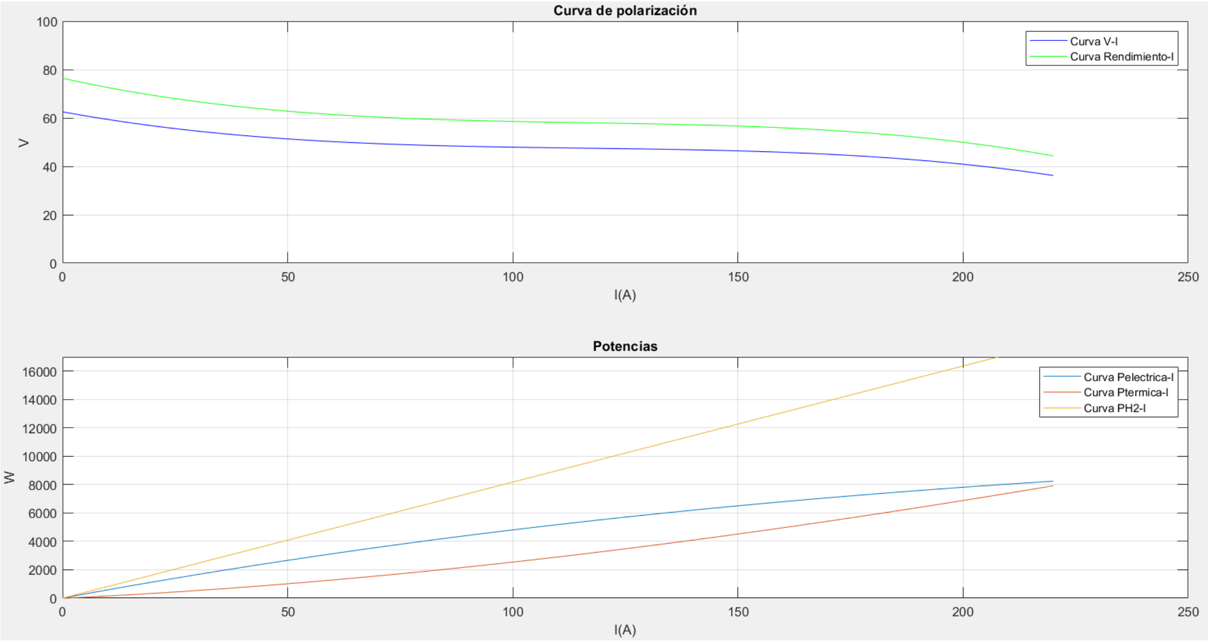

Figura 3. Curvas de polarización de la pila de combustible.

La apariencia de la curva es similar a las otorgadas por los distintos fabricantes como (PowerCellution, 2021), por lo que se puede decir que el resultado se ajusta a los ofrecidos por diversos fabricantes.

Las expresiones polinómicas que se obtienen son las siguientes:

```
CVI =
   -0.0000    0.0027   -0.3411   62.5420

CVP =
    0.0001   -0.1143   58.6486    7.2384

CVT =
   -0.0001    0.1140   23.0586   -7.1776

CVR =
   -0.0000    0.0033   -0.4140   76.4169

CVH =
    0.0000   -0.0000   81.8050    0.0000
```

El hecho de poder definir las curvas de polarización y de potencias en forma polinomial, aunque sea de forma aproximada implica una simplificación notable en el cálculo de puntos de funcionamiento de estos sistemas. Ya que se obtienen una serie de correlaciones simplificadas que permite simular el comportamiento de la pila de combustible.

Una justificación para el planteamiento de este apartado es que se quiera obtener el punto de mínima RCE (ya que este punto será el punto de mínimas pérdidas térmicas en la pila de combustible dentro de un estado normal de funcionamiento). Si se planteara el sistema como un sistema de generación de energía eléctrica interesaría trabajar en regiones cercanas al punto de mínima RCE.

De hecho, si se quisiera buscar analíticamente este punto de funcionamiento, se debería atender a la siguiente expresión de la tensión en bornes de la pila (Barbir, 2005):

$$V_{fc} = E_{r,T,P} - \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i + i_{loss}}{i_0}\right) - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) - i \cdot R_i$$

Se puede plantear que el punto de menor RCE es aquel en el que la diferencia entre la potencia térmica y la eléctrica sea mayor, es decir, que la derivada de la siguiente expresión se anule:

$$\begin{aligned} P_{term} - P_{elect} &= \frac{P_{elect}}{\eta_{elect}} \cdot (1 - \eta_{elect}) - P_{elect} = \frac{P_{elect}}{\eta_{elect}} \cdot (1 - 2 \cdot \eta_{elect}) \\ &= P_{H2} \cdot (1 - 2 \cdot \eta_{elect}) = P_{H2} - 2 \cdot P_{elect} = \frac{P_{elect}}{\eta_{elect}} - 2 \cdot P_{elect} \end{aligned}$$

Se comprueba que el rendimiento eléctrico guarda una relación lineal con la tensión en bornes de la pila:

$$\eta_{elect} = V_{fc} \cdot C$$

De tal manera que la expresión de la potencia térmica menos la potencia eléctrica queda de la siguiente forma:

$$P_{term} - P_{elect} = \frac{V_{fc} \cdot i}{V_{fc} \cdot C} - 2 \cdot V_{fc} \cdot i = i \cdot \left(\frac{1}{C} - 2 \cdot V_{fc}\right)$$

Esta expresión ha de ser derivada para poder optimizar el punto de funcionamiento, sin embargo, a priori no se tiene un valor de C, además la expresión de i no puede resolverse analíticamente, sino numéricamente.

$$\begin{aligned} 2 \cdot R_i \cdot i \; - \; 2 \cdot E_r + \; i \cdot \left(2 \cdot R_i \; - \frac{2 \cdot R \cdot T}{F \cdot n \cdot (i \; - \; i_L)} + \frac{2 \cdot R \cdot T}{F \cdot a \cdot (i \; + \; i_{loss})}\right) + \frac{1}{C} \\ + \frac{\left(2 \cdot R \cdot T \cdot log\left(\frac{i \; + \; i_{loss}}{i_0}\right)\right)}{F \cdot a} + \frac{\left(2 \cdot R \cdot T \cdot log\left(-\frac{i_L}{i \; - \; i_L}\right)\right)}{F \cdot n} = 0 \end{aligned}$$

Con los polinomios interpolados se puede obtener la misma expresión en forma polinomial, lo cual permite estudiar fácilmente el punto de mínima RCE, en este caso se ha utilizado el siguiente código:

```
Pelec=CVP;
Pterm=CVT;
% Palim=CVH;

% Problema de optimizacion 1

q = polyder(Pelec-Pterm);

raices=roots(q)

RCEMin=polyval(CVT,raices(2))/polyval(CVP,raices(2))
```

consiguiéndose la RCE mínima con una corriente de 85.8249 A.

```
raices =

  847.2982
   85.8249


RCEMin =

    0.6494
```

Finalmente, para completar el proceso de modelado y ajuste del sistema de regulación de la pila de combustible que satisfaga la **demanda térmica**, se ha planteado una simplificación de las relaciones obtenidas para el sistema, resultando de ello las curvas características de la pila en forma polinomial. Esto representa una alternativa de resolución analítica de problemas sobre pilas de combustible, además de fijar un procedimiento de ensayo que permite obtener estas curvas características.