

## ÍNDICE GENERAL

<b>PREFACIO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>1. CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL</b> .....	5
<b>2. ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO</b> .....	7
<b>3. LAS PILAS DE COMBUSTIBLE</b> .....	10
<b>3.1. ORÍGENES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE</b> .....	10
<b>3.2. DEFINICIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE</b> .....	12
<b>3.3. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE</b> .....	13
3.3.1. <i>Pilas de Combustible Alcalinas (AFC)</i> .....	13
3.3.2. <i>Pilas de Combustible de Membrana Polimérica (PEM)</i> .....	14
3.3.3. <i>Pilas de Combustible de Conversión directa de metanol (DMF)</i> .....	15
3.3.4. <i>Pilas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)</i> .....	15
3.3.5. <i>Pilas de Combustible de Carbono Fundido (MCFC)</i> .....	16
3.3.6. <i>Pilas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)</i> .....	17
<b>3.4. VENTAJAS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE</b> .....	18
<b>3.5. APLICACIONES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE</b> .....	21
<b>4. PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)</b> .....	22
<b>4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM</b> .....	22
<b>4.2. COMPONENTES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM</b> .....	22
4.2.1. <i>Membrana de intercambio de protones, electrolito</i> .....	24
4.2.2. <i>Electrodos</i> .....	26
4.2.2.1 <i>Capa de catalizador</i> .....	27
4.2.2.2. <i>Capa de difusión</i> .....	28
4.2.3. <i>Canales de gases</i> .....	29
4.2.4. <i>Placas colectoras de corriente</i> .....	29
<b>5. CONFIGURACIÓN DE UN PILA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM</b> .....	30
<b>5.1. DIFERENTES CONFIGURACIONES DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE</b> .....	31
<b>5.2. HUMIDIFICACIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE</b> .....	33
5.2.1. <i>Método de funcionamiento en “seco”</i> .....	33
5.2.2. <i>Método de burbujeo en agua a temperatura controlada</i> .....	33
5.2.3. <i>Método de “Inyección Directa”</i> .....	33
5.2.4. <i>Método de “Autohumidificación”</i> .....	34

<b>6. TERMODINÁMICA Y ELECTROQUÍMICA DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM.....</b>	<b>34</b>
<b>6.1. REACCIONES ELECTROQUÍMICAS.....</b>	<b>34</b>
<b>6.2. TERMODINÁMICA DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE .....</b>	<b>36</b>
6.2.1. Poder calorífico superior e inferior del hidrógeno.....	36
6.2.2. Trabajo eléctrico teórico.....	37
6.2.3. Potencial teórico de una pila de combustible.....	38
<b>6.3. POLARIZACIONES DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE.....</b>	<b>40</b>
6.3.1. Polarización por activación, $\eta_{act}$ .....	41
6.3.2. Polarización por caída óhmica, $\eta_{ohm}$ .....	51
6.3.3. Polarización por transferencia de materia, $\eta_{cnc}$ .....	52
<b>7. TRANSPORTE DEL AGUA.....</b>	<b>54</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>57</b>
<b>CAPÍTULO II. OBJETIVO.....</b>	<b>65</b>
<b>1. OBJETIVO.....</b>	<b>67</b>
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>71</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>73</b>
<b>2. CÁLCULO DE LOS CAUDALES DE GASES.....</b>	<b>85</b>
<b>3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>86</b>
<b>3.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y DINÁMICO.....</b>	<b>86</b>
3.1.1. Modo ánodo cerrado (dead-end).....	87
3.1.2. Modo ánodo abierto.....	88
<b>3.2. ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE MEDIANTE LA TÉCNICA DE IMPEDANCIAS ELECTROQUÍMICAS.....</b>	<b>89</b>

<b>CAPÍTULO IV. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE EN MODO ÁNODO CERRADO O <i>DEAD-END</i></b> .....	93
1. INTRODUCCIÓN.....	95
2. CURVAS DE POLARIZACIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	95
3. COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	100
3.1. MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO	100
3.2. EFECTO DEL COEFICIENTE ESTEQUIOMÉTRICO DEL AIRE SOBRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	101
3.2.1. <i>Pila de combustible</i> .....	102
3.2.2. <i>Celdas individuales</i> .....	114
3.3. EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN Y DE HUMIDIFICACIÓN SOBRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.	121
3.3.1. <i>Efecto de la temperatura de operación en ausencia de humidificación</i> .....	121
3.3.2. <i>Efecto de la temperatura de operación a temperatura de humidificación constante</i> .....	125
3.3.3. <i>Efecto de la temperatura de humidificación a temperatura de operación constante</i> .....	129
3.3.4. <i>Efecto de las temperaturas de operación y de humidificación sobre el potencial de las celdas individuales</i> .....	132
3.4. PARÁMETROS CINÉTICOS.....	138
3.4.1. <i>Efecto de las temperaturas de operación y de humidificación</i> .....	140
3.4.1.1. <i>Resistencia de las celdas individuales</i> .....	141
3.4.1.2. <i>Resistencia de la pila de combustible</i> .....	143
3.4.2. <i>Efecto del coeficiente estequiométrico del aire</i> .....	145
4. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE..	146
4.1. EFECTO DE LOS CAMBIOS EN LA DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA.....	147
4.1.1. <i>Cambios positivos en la densidad de corriente <math>\Delta i &gt; 0</math></i> .....	149
4.1.2. <i>Cambios negativos en la densidad de corriente <math>\Delta i &lt; 0</math></i> .....	152
4.2. EFECTO DEL COEFICIENTE ESTEQUIOMÉTRICO DEL AIRE.....	155
4.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN A TEMPERATURA DE HUMIDIFICACIÓN CONSTANTE.....	172
4.3.1. <i>Control por activación</i> .....	172
4.3.2. <i>Control por caída óhmica</i> .....	175
4.3.3. <i>Control por transferencia de materia</i> .....	179

4.4. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE HUMIDIFICACIÓN A TEMPERATURA DE OPERACIÓN CONSTANTE.....	182
4.4.1. Control por activación.....	182
4.4.2. Control por caída óhmica.....	184
4.4.3. Control por transferencia de materia.....	187
5. CONCLUSIONES.....	190
6. BIBLIOGRAFÍA.....	193
<b>CAPÍTULO V. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE EN MODO ÁNODO ABIERTO.....</b>	<b>199</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	201
2. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	202
2.1. EFECTO DEL CAUDAL DE ALIMENTACIÓN DE LOS GASES SOBRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	202
2.1.1. Efecto del coeficiente estequiométrico del hidrógeno.....	202
2.1.1.1. Pila de combustible.....	202
2.1.1.2. Celdas individuales.....	206
2.1.2. Funcionamiento de la pila de combustible alimentando los gases a un caudal constante.....	210
2.2. EFECTO DE LA PRESIÓN SOBRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	218
2.3. EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN Y DE HUMIDIFICACIÓN SOBRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	222
2.4. EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN Y DE HUMIDIFICACIÓN SOBRE EL POTENCIAL DE LAS CELDAS INDIVIDUALES.....	225
2.5. PARÁMETROS CINÉTICOS.....	232
2.5.1. Efecto de las temperaturas de operación y humidificación sobre la resistencia de las celdas individuales.....	234
2.5.2. Efecto de las temperaturas de operación y de humidificación sobre la resistencia de la pila de combustible.....	237
2.5.3. Efecto del coeficiente estequiométrico del hidrógeno sobre la resistencia de la pila de combustible.....	238
2.5.4. Efecto de la presión sobre la resistencia de la pila de combustible.....	239
3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE..	241
3.1. EFECTO DE LOS CAMBIOS DE DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA.....	241
3.1.1. Cambios positivos en la densidad de corriente $\Delta i > 0$ .....	242
3.1.2. Cambios negativos de densidad de corriente $\Delta i < 0$ .....	245

<b>3.2. EFECTO DEL COEFICIENTE ESTEQUIOMÉTRICO DEL HIDRÓGENO.....</b>	247
<b>3.3. EFECTO DE LA PRESIÓN.....</b>	250
<b>3.4. EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN Y DE HUMIDIFICACIÓN.....</b>	252
<b>3.4.1. Control por activación.....</b>	252
<b>3.4.2. Control por caída óhmica.....</b>	255
<b>3.4.3. Control por transferencia de materia.....</b>	258
<b>4. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO Y DINÁMICO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE EN MODO ÁNODO CERRADO Y ÁNODO ABIERTO.....</b>	261
<b>4.1. COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....</b>	261
<b>4.2. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....</b>	263
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	266
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	271
<b>CAPÍTULO VI. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO UNA PILA DE COMBUSTIBLE MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIAS ELECTROQUÍMICAS (EIS) .....</b>	275
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	277
<b>1.1. CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE.....</b>	280
<b>1.1.1. Resistor.....</b>	280
<b>1.1.2. Capacitor.....</b>	281
<b>1.1.3. Inductor.....</b>	281
<b>1.1.4. Elementos distribuidos.....</b>	282
<b>1.1.4.1. Elemento de fase constante (CPE) .....</b>	282
<b>1.1.4.2. Impedancia Warburg.....</b>	284
<b>1.2. CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEM.....</b>	285
<b>2. MODELIZACIÓN DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM MEDIANTE EIS.....</b>	286

<b>3. EFECTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA SOBRE LOS ESPECTROS DE IMPEDANCIAS.....</b>	<b>294</b>
<b>3.1. PILA DE COMBUSTIBLE.....</b>	<b>295</b>
<b>3.2. CELDAS INDIVIDUALES.....</b>	<b>298</b>
<b>3.3. EFECTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE SOBRE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS.....</b>	<b>301</b>
3.3.1. <i>Pila de combustible.....</i>	301
3.3.2. <i>Celda individual.....</i>	308
<b>4. EFECTO DE LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN Y DE HUMIDIFICACIÓN SOBRE LOS ESPECTROS DE IMPEDANCIAS....</b>	<b>314</b>
<b>4.1. PILA DE COMBUSTIBLE.....</b>	<b>314</b>
4.1.1. <i>Control por activación.....</i>	314
4.1.2. <i>Control por caída óhmica.....</i>	321
4.1.3. <i>Control por transferencia de materia.....</i>	327
<b>4.2. CELDAS INDIVIDUALES.....</b>	<b>333</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>349</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>353</b>
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES FINALES.....</b>	<b>357</b>
<b>1. CONCLUSIONES FINALES.....</b>	<b>359</b>
<b>RESÚMENES.....</b>	<b>365</b>