

## ■ ÍNDICE

### CAPÍTULO 1. Introducción

---

<b>1.1</b>	<b><i>Problemática Energética Actual</i></b>	<b>1</b>
1.1.1	<i>Consumo mundial de energía</i>	1
1.1.2	<i>Problemática de la dependencia de los combustibles fósiles</i>	4
1.1.2.1	Desajuste entre la localización de la demanda y de la producción	5
1.1.2.2	Inestabilidad política de las zonas geográficas donde se localizan las reservas	6
1.1.2.3	Problemas de contaminación ambiental asociados a su combustión	7
1.1.2.4	Agotamiento de los combustibles fósiles	8
1.1.3	<i>Legislación y políticas energéticas y medioambientales</i>	8
1.1.3.1	Ámbito Internacional	9
1.1.3.2	Unión Europea	10
<b>1.2</b>	<b><i>El Hidrógeno</i></b>	<b>10</b>
1.2.1	<i>Importancia del Hidrógeno</i>	10
1.2.2	<i>Métodos de producción de Hidrógeno</i>	13
1.2.2.1	Reformado de hidrocarburos	15
1.2.2.2	Oxidación parcial de hidrocarburos	16
1.2.2.3	Gasificación	17
1.2.2.4	Electrólisis del agua	18
1.2.2.5	Procesos Termoquímicos del agua	18
1.2.2.6	Comparativa de los procesos	19
1.2.3	<i>Aplicaciones del Hidrógeno</i>	19
1.2.3.1	Aplicaciones industriales	20
1.2.3.2	Aplicaciones energéticas	22
<b>1.3</b>	<b><i>Referencias</i></b>	<b>25</b>

## CAPÍTULO 2. Electrólisis del Agua

---

<b>2.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Principales Tipos de Electrolizadores</b>	<b>31</b>
2.2.1	<i>Electrolizadores Alcalinos</i>	31
2.2.2	<i>Electrolizadores de Membrana de Intercambio Protónico (tipo PEM)</i>	34
2.2.3	<i>Electrolizadores de Óxido Sólido</i>	35
2.2.4	<i>Comparación de los distintos tipos de electrolizadores</i>	36
<b>2.3</b>	<b>Fundamentos de la Electrólisis del Agua</b>	<b>37</b>
2.3.1	<i>Circuito eléctrico análogo a las celdas de electrólisis del agua</i>	37
<b>2.4</b>	<b>Aspectos Termodinámicos</b>	<b>40</b>
2.4.1	<i>Voltaje de celda teórico</i>	40
2.4.2	<i>Eficiencia del proceso de electrólisis</i>	44
<b>2.5</b>	<b>Aspectos Cinéticos</b>	<b>46</b>
<b>2.6</b>	<b>Reacción de Evolución de Hidrógeno (REH)</b>	<b>50</b>
<b>2.7</b>	<b>Electrocatalisis de la REH. Métodos para reducir el Sobrepotencial de Electrodo</b>	<b>58</b>
2.7.1	<i>Actividad Electrocatalítica Intrínseca para la REH</i>	59
<b>2.8</b>	<b>Cátodos empleados en la REH</b>	<b>61</b>
2.8.1	<i>Parámetros empleados en la Evaluación de la Actividad Catalítica de los electrodos</i>	62
<b>2.9</b>	<b>Referencias</b>	<b>63</b>

## CAPÍTULO 3. Objetivos

---

<b>3.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>67</b>
------------	------------------	-----------

## CAPÍTULO 4. Metodología Experimental

---

<b>4.1</b>	<b>Electrodeposición</b>	<b>71</b>
4.1.1	<i>Principios de la Electrodeposición</i>	72

4.1.2	<i>Dispositivos experimentales</i>	74
4.1.3	<i>Material Sustrato: Acero inoxidable AISI 304</i>	76
4.1.4	<i>Pretratamiento del acero inoxidable AISI 304 sobre el que se desarrollan los electrocatalizadores</i>	78
<b>4.2</b>	<b><i>Técnicas empleadas en la caracterización de los electrodos desarrollados</i></b>	<b>81</b>
<b>4.3</b>	<b><i>Técnicas de Análisis de Superficies empleadas en la caracterización de los electrodos desarrollados</i></b>	<b>82</b>
4.3.1	<i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i>	82
4.3.1.1	Principios básicos de la técnica	83
4.3.1.2	Dispositivo experimental empleado y condiciones experimentales aplicadas	83
4.3.2	<i>Microscopía Confocal</i>	83
4.3.2.1	Principios básicos de la técnica	84
4.3.2.2	Ventajas de la microscopía confocal	86
4.3.2.3	Dispositivo experimental empleado	86
<b>4.4</b>	<b><i>Técnicas Electroquímicas, Dispositivos y Materiales empleados para la caracterización de los electrodos desarrollados</i></b>	<b>87</b>
4.4.1	<i>Dispositivos Experimentales</i>	87
4.4.2	<i>Disolución de Trabajo</i>	91
4.4.3	<i>Curvas de Polarización de Estado Estacionario</i>	92
4.4.3.1	Principios básicos de la técnica	92
4.4.3.2	Desarrollo Experimental	94
4.4.4	<i>Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)</i>	95
4.4.4.1	Principios básicos de la técnica	96
4.4.4.2	Representaciones gráficas	98
4.4.4.3	Interpretación de la respuesta de impedancia	100
4.4.4.4	Elementos constituyentes de los Circuitos Eléctricos	101
4.4.4.5	Desarrollo Experimental	103
4.4.5	<i>Curvas de Descarga de Hidrógeno</i>	104
4.4.5.1	Desarrollo Experimental	106
4.4.6	<i>Ensayos galvanostáticos</i>	106

4.4.6.1	<i>Desarrollo Experimental</i>	108
<b>4.5</b>	<b><i>Referencias</i></b>	<b>109</b>

## CAPÍTULO 5. Resultados y Discusión

<b>5.1</b>	<b><i>Electrodos Níquel Raney</i></b>	<b>111</b>
5.1.1	<i>Introducción</i>	111
5.1.2	<i>Electrodos Níquel-Raney (NiR)</i>	113
5.1.2.1	Síntesis de los electrodos NiR	113
5.1.2.2	Caracterización Superficial de los electrodos NiR	114
5.1.2.3	Caracterización Electroquímica de los electrodos NiR	117
5.1.2.3.a	Estudio de las curvas de polarización de estado estacionario de los electrodos NiR	117
5.1.2.3.b	Estudio de las medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica de los electrodos NiR	122
5.1.2.3.c	Mecanismo de la REH sobre los electrodos NiR	134
5.1.3	<i>Electrodos Níquel-Raney con adición gradual del Zn (NiR2)</i>	139
5.1.3.1	Síntesis de los electrodos NiR2	139
5.1.3.2	Caracterización Superficial de los electrodos NiR2	140
5.1.3.3	Caracterización Electroquímica de los electrodos NiR2	141
5.1.3.3.a	Estudio de las curvas de polarización de estado estacionario de los electrodos NiR2	141
5.1.3.3.b	Estudio de las medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica de los electrodos NiR2	144
5.1.3.3.c	Mecanismo de la REH sobre los electrodos NiR2	150
5.1.4	<i>Electrodos NiCo-Raney (NiCoR)</i>	153
5.1.4.1	Introducción	153
5.1.4.2	Síntesis de los electrodos NiCoR	153
5.1.4.3	Caracterización Superficial de los electrodos NiCoR	154
5.1.4.4	Caracterización Electroquímica de los electrodos NiCoR	156
5.1.4.4.a	Estudio de las curvas de polarización de estado estacionario de los electrodos NiCoR	156
5.1.4.4.b	Estudio de las medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica de los electrodos NiCoR	161

5.1.4.4.c	Mecanismo de la REH sobre los electrodos NiCoR	168
5.1.5	<i>Conclusiones</i>	170
<b>5.2</b>	<b><i>Electrodos de base Níquel obtenidos a alta densidad de corriente</i></b>	<b>172</b>
5.2.1	<i>Introducción</i>	172
5.2.2	<i>Electrodos de Níquel puro obtenidos a alta densidad de corriente NiAdc</i>	173
5.2.2.1	Síntesis de los electrodos NiAdc	173
5.2.2.2	Caracterización Superficial de los electrodos NiAdc	174
5.2.2.3	Caracterización Electroquímica de los electrodos NiAdc	176
5.2.2.3.a	Estudio de las curvas de polarización de estado estacionario de los electrodos NiAdc	176
5.2.2.3.b	Estudio de las medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica de los electrodos NiAdc	179
5.2.2.3.c	Mecanismo de la REH sobre los electrodos NiAdc	190
5.2.3	<i>Electrodos de Níquel puro obtenidos a alta densidad de corriente NiAdc2</i>	194
5.2.3.1	Síntesis de los electrodos NiAdc2	194
5.2.3.2	Caracterización Superficial de los electrodos NiAdc2	195
5.2.3.3	Caracterización Electroquímica de los electrodos NiAdc2	196
5.2.3.3.a	Estudio de las curvas de polarización de estado estacionario de los electrodos NiAdc2	196
5.2.3.3.b	Estudio de las medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica de los electrodos NiAdc2	200
5.2.3.3.c	Mecanismo de la REH sobre los electrodos NiAdc2	207
5.2.4	<i>Electrodos Níquel-Cobalto obtenidos a alta densidad de corriente (NiCoAdc)</i>	210
5.2.5	<i>Conclusiones</i>	236
<b>5.3</b>	<b><i>Referencias</i></b>	<b>238</b>

## CAPÍTULO 6. Comparación de Resultados y Evaluación de Eficiencias Energéticas

---

<b>6.1</b>	<b><i>Introducción</i></b>	<b>243</b>
<b>6.2</b>	<b><i>Comparación de resultados del estudio electroquímico preliminar</i></b>	<b>245</b>
<b>6.3</b>	<b><i>Caracterización de los electrodos mediante curvas de descarga de hidrógeno</i></b>	<b>249</b>

<b>6.4</b>	<b><i>Caracterización de los electrodos mediante ensayos galvanostáticos</i></b>	<b>253</b>
<b>6.5</b>	<b><i>Eficiencia Energética de los electrodos caracterizados</i></b>	<b>262</b>
<b>6.6</b>	<b><i>Conclusiones</i></b>	<b>265</b>
<b>6.7</b>	<b><i>Referencias</i></b>	<b>267</b>

## **CAPÍTULO 7. Conclusiones / Conclusions**

---

<b>7.1</b>	<b><i>Conclusiones</i></b>	<b>269</b>
7.1.1	<i>Síntesis de Electroodos</i>	269
7.1.1.1	Electrodos tipo Raney	270
7.1.1.2	Electrodos obtenidos a altas densidades de corriente	271
7.1.2	<i>Conclusiones del Estudio de Curvas de Polarización de Estado Estacionario y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)</i>	272
7.1.1.1	Electrodos tipo Raney	273
7.1.1.2	Electrodos obtenidos a altas densidades de corriente	275
7.1.3	<i>Conclusiones del Estudio de Eficiencias Energéticas</i>	276
<b>7.2</b>	<b><i>Conclusions</i></b>	<b>278</b>
7.2.1	<i>Synthesis of Electrodes</i>	278
7.2.1.1	Type Raney Electrodes	279
7.2.1.2	High current density Electrodes	280
7.2.2	<i>Conclusions from the Study of Steady-State Polarization Curves and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	281
7.2.1.1	Type Raney Electrodes	282
7.2.1.2	High current density Electrodes	283
7.2.3	<i>Conclusions concerning the Energy Efficiency study</i>	284
<hr style="border: 1px solid black;"/>		
	<b><i>RESUMEN</i></b>	<b>287</b>
	<b><i>RESUM</i></b>	<b>289</b>
	<b><i>ABSTRACT</i></b>	<b>291</b>