	GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS	Código	FO-SB-12/v0
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		Página

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

NOMBRE(S): ERICK DANIEL APELLIDOS: RINCÓN CASTRILLO

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DIRECTOR: M.Sc. JOSÉ RICARDO BERMÚDEZ SANTAELLA

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): “MODELAMIENTO Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA QUE PRODUCE OXIHIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE COMPLEMENTARIO”

RESUMEN

Las celdas electrolíticas han impactado la industria automotriz, utilizándose para enriquecer motores a gasolina, y diesel con derivados de la electrólisis (H_2 , O_2 , y HHO), provocando una disminución en los gases de combustión (CO , y CO_2), en consecuencia, es necesario un estudio de los electrolizadores enfocado en el cambio de fase. En este trabajo se presenta el modelo dinámico de una celda electrolítica seca comercial que produce oxihidrógeno con una capacidad máxima de 2,25 L/min, las ecuaciones se plantearon teniendo en cuenta las leyes de la termodinámica fundamental, relaciones empíricas de corriente – voltaje, también se ha desarrollado un modelo térmico por medio del balance de energía en el electrolizador que tiene en cuenta la energía aportada por el electrolito (KOH o $NaHCO_3$) contrario a los modelos encontrados en la literatura de electrolizadores. Los datos experimentales corroboraron que, cuando aumenta la cantidad de electrolito suministrado, el paso de la corriente, la temperatura y el caudal de oxihidrógeno en la celda son directamente proporcionales a esta variación, este comportamiento fue predicho por la simulación.

PALABRAS CLAVE: Modelo matemático, celda electrolítica, electrolito, estrategia de control, interfaz de monitoreo.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 150 PLANOS: ILUSTRACIONES: CD ROOM: 1

Elaboró		Revisó		Aprobó	
Equipo Operativo del Proceso		Comité de Calidad		Comité de Calidad	
Fecha	24/10/2014	Fecha	05/12/2014	Fecha	05/12/2014

MODELAMIENTO Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE UNA CELDA
ELECTROLÍTICA QUE PRODUCE OXIHIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
COMPLEMENTARIO

ERICK DANIEL RINCÓN CASTRILLO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
PLAN DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2019

MODELAMIENTO Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE UNA CELDA
ELECTROLÍTICA QUE PRODUCE OXIHIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
COMPLEMENTARIO

ERICK DANIEL RINCÓN CASTRILLO

Proyecto de grado modalidad investigación presentado como requisito para optar por el título
de ingeniero electromecánico.

DIRECTOR

M.Sc. I.E. JOSÉ RICARDO BERMÚDEZ SANTAELLA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
PLAN DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2019

**ACTA DE SUSTENTACIÓN PROYECTO DE GRADO
MODALIDAD TRABAJO DE GRADO INVESTIGATIVO**

FECHA: 14 de junio de 2019

HORA: 04:30: P.M

LUGAR: Vicerrectoría de Investigación - 3 Piso

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TÍTULO DEL TRABAJO INVESTIGATIVO: "MODELAMIENTO Y DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA QUE PRODUCE OXIHIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE COMPLEMENTARIO".

JURADOS

Mgs: JOSE RAFAEL EUGENIO LÓPEZ

Mgs: LUIS EMILIO VERA DUARTE

Esp: JUAN CARLOS RAMIREZ BERMUDEZ

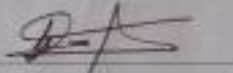
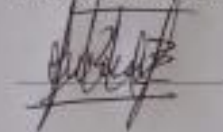
DIRECTOR:

Mgs: JOSE RICARDO BERMÚDEZ SANTAELLA

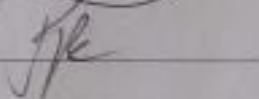
LAUREADA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACION
ERICK DANIEL RINCÓN CASTRILLO	1090927	5.0

FIRMA DE LOS JURADOS:



VOBO, COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR



(Firma)

Resumen

Las celdas electrolíticas han impactado la industria automotriz, utilizándose para enriquecer motores a gasolina, y diesel con derivados de la electrólisis (H_2 , O_2 , y HHO), provocando una disminución en los gases de combustión (CO , y CO_2), en consecuencia, es necesario un estudio de los electrolizadores enfocado en el cambio de fase. En trabajo se presenta el modelo dinámico de una celda electrolítica seca comercial que produce oxihidrógeno con una capacidad máxima de 2,25 L/min, las ecuaciones se plantearon teniendo en cuenta las leyes de la termodinámica fundamental, relaciones empíricas de corriente – voltaje, también se ha desarrollado un modelo térmico por medio del balance de energía en el electrolizador que tiene en cuenta la energía aportada por el electrolito (KOH o $NaHCO_3$) contrario a los modelos encontrados en la literatura de electrolizadores. En la simulación se utilizó el software EES para determinar el valor de las variables termodinámicas (entalpía, entropía, y energía libre) que se ven afectadas por el aumento de temperatura en el cambio de fase (líquido a gas) del fluido de trabajo, las ecuaciones son simuladas en Matlab-Simulink®, se utilizó el método de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones no lineales, y un Ajuste de Mínimos Cuadrados por el uso de las relaciones electroquímicas empíricas. Los datos experimentales corroboraron que, cuando aumenta la cantidad de electrolito suministrado, el paso de la corriente, la temperatura y el caudal de oxihidrógeno en la celda son directamente proporcionales a esta variación, este comportamiento fue predicho por la simulación.

Dedicatoria

A Dios por darme fortaleza en los momentos de dificultad, y poner personas en los momentos en donde necesité asesoría.

A mi madre Luz Castrillo, y mi padre Alfredo Rincón, quienes me han ayudado de forma incondicional no sólo en la realización de este proyecto, más bien durante toda mi vida.

A mi madrina Yasmith Castrillo por su amor brindado desde mi niñez, incluso en algunos momentos cumpliendo el rol de madre.

A cada uno de los compañeros con los que tuve la oportunidad de cursar materias, y compartir momentos de integración fuera de las aulas de clase.

Erick Daniel Rincón Castrillo

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a:

Al M.Sc. Ing. y director del proyecto José Ricardo Bermúdez Santaella por su apoyo en lo académico, investigativo, económico, y motivacional, hubiese sido muy difícil culminar esta etapa de mi vida sin su ayuda.

Al Ph.D. M.Sc. y Ing. Juan José García Pabón por cumplir el rol de mentor en mi proceso de formación como investigador.

Al M.Sc. y Ing. Rafael Eugenio por su disponibilidad en los momentos en que necesité de alguna asesoría o presentarle avances de este proyecto.

Al M.Sc. y Ing. Emilio Vera por mostrarse siempre atento en los momentos en que necesité presentarle avances de este proyecto.

A los integrantes de la Familia GIDPI con quienes tuve la oportunidad de compartir momentos de integración (asados, paseos, y ciclorruta), estos espacios son vitales para quienes nos estamos formando como investigadores; éxitos para Frank Blanco, Johans Becerra, Yeiner Carrillo, Neiber Herrera, Natalia Sepúlveda, Brian Pérez, Náthaly Patiño, Daniel Susa, Angie Chaya, Esneider Acevedo, y Lina Gutiérrez.

Contenido

Introducción	23
1 Problema	25
1.1 Título	25
1.2 Planteamiento Del Problema	25
1.3 Formulación Del Problema	27
1.4 Objetivos	27
1.4.1 Objetivo General	27
1.4.2 Objetivos Específicos	28
1.5 Justificación	28
1.5.1 Beneficios Tecnológicos	29
1.5.2 Beneficios Institucionales	29
1.5.3 Beneficios Científicos	30
1.6 Alcances Y Limitaciones	30
1.6.1 Alcances	30
1.6.2 Limitaciones	30
1.7 Delimitaciones	31
1.7.1 Delimitación Espacial	31
1.7.2 Delimitación Temporal	31

1.7.3	Delimitación Conceptual	31
2	Marco Referencial	32
2.1	Antecedentes	32
2.2	Marco Teórico	34
2.2.1	Termodinámica	34
2.2.2	Balance De Materia Y Energía	35
2.2.3	Electroquímica	38
2.2.4	Sensores Y Acondicionadores De Señal	40
2.2.5	Control Automático	41
2.3	Marco Conceptual	43
2.3.1	Electrólisis Del Agua	43
2.3.2	Celda Electrolítica	44
2.3.3	Electrolizador Alcalino	44
2.3.4	Electrolito	44
2.4	Marco Contextual	44
2.5	Marco Legal	45
2.5.1	Acuerdo 069/1997	45
2.5.2	Ley 697 De 2001 De Colombia	45
2.5.3	Ley 1715 De 2014 De Colombia	45
2.5.4	Convenio De Viena De 1980	45

2.5.5	Protocolo De Montreal De 1989	45
2.5.6	Protocolo De Kioto De 2005	45
2.5.7	Normas Ansi / Isa S 5.1- 1984 (R1992)	46
2.6	Glosario De Términos	46
2.6.1	Electrólisis Del Agua	46
2.6.2	Celda Electrolítica	46
2.6.3	Electrolizador Alcalino	46
2.6.4	Electrolito	47
2.6.5	Cátodo	47
2.6.6	Ánodo	47
2.6.7	Diafragma	47
2.6.8	Sobrevoltaje De Activación	47
2.6.9	Sobrevoltaje De Difusión	48
2.6.10	Sobrevoltaje Óhmico.	48
3	Diseño Metodológico	49
3.1	Tipo De Investigación	49
3.2	Técnicas De Recolección De Datos	50
3.2.1	Fuentes Primarias	50
3.2.2	Fuentes Secundarias	50
3.3	Análisis, Procesamiento De Datos Y Presentación De Resultados	51

3.3.1	Análisis	51
3.3.2	Procesamiento De Datos	51
3.3.3	Presentación De Resultados	51
3.4	Actividades Y Metodología	51
3.4.1	Desarrollar El Modelo Matemático Que Describe El Funcionamiento De La Celda Electrolítica.	51
3.4.2	Realizar Las Simulaciones Del Comportamiento Dinámico De La Celda Electrolítica A Través De La Herramienta Matlab-Simulink®.	52
3.4.3	Seleccionar El Electrolito Que Permita Hacer Más Eficiente La Producción De Oxihidrógeno Teniendo En Cuenta La Relación Costo Beneficio.	52
3.4.4	Seleccionar La Instrumentación Requerida Para El Proceso De Producción De Oxihidrógeno.	53
3.4.5	Diseñar La Estrategia De Control Adecuada Para La Óptima Producción De Oxihidrógeno.	53
3.4.6	Diseñar La Interfaz De Monitoreo Y Adquisición De Datos Utilizando El Software Labview.	54
4	Desarrollo Del Proyecto	55
4.1	Descripción De La Planta	55
4.1.1	Descripción De Los Componentes	56
5	Modelamiento Dinámico De La Celda Electrolítica Para Producir Oxihidrógeno	58
5.1	Clasificación De Las Celdas De Combustible	58

5.1.1	Celdas De Combustible Alcalina (Afc)	59
5.1.2	Celdas De Combustible De Membrana De Intercambio Protónico (Pemfc)	60
5.1.3	Celdas De Combustible De Metanol Directo (Dmfc)	62
5.1.4	Celdas De Combustible De Ácido Fosfórico (Pafc)	63
5.1.5	Celdas De Combustible De Carbonato Fundido (Mfcf)	64
5.1.6	Celdas De Combustible De Óxido Sólido (Sofc)	65
5.2	Tipo De Modelo Dinámico Utilizado	66
5.3	Reacciones Químicas Y Teoría Iónica	67
5.3.1	Unidad De Cantidad De Electricidad	67
5.3.2	Corriente Eléctrica En Conductores Iónicos	69
5.4	Celda Electrolítica Alcalina	69
5.4.1	Principio De Funcionamiento	70
5.4.2	Modelo Matemático	71
6	Simulación Y Análisis De Resultados	86
6.1	Datos De La Simulación	86
6.2	Simulación De La Celda Electrolítica	90
6.2.1	Cálculo De Las Variables Termodinámicas Por Medio Del Software Ees	91
6.2.2	Implementación Del Modelo En Simulink	92
6.3	Resultados De La Simulación Y Validación	102
7	Selección Del Electrolito	110

8	Selección De La Instrumentación	114
8.1	Selección Del Sensor De Corriente	114
8.2	Selección Del Sensor De Temperatura	119
9	Estrategia De Control	122
10	Diseño De La Interfaz De Monitorización	127
10.1	Reglas Para El Diseño De Interfaces	128
10.2	Configuración De Los Sensores En La Daq Ni 6009	128
10.3	Interfaz De Monitorización	130
11	Costos	134
11.1	Gastos En Equipos	134
11.2	Gastos De Personal	135
12	Conclusiones	136
13	Divulgación Científica	138
13.1	Apropiación Social Del Conocimiento	138
13.1.1	Evento Científico: III Simposio De Investigación En Ingeniería Y Desarrollo Sostenible Y La II Olimpiada De Robótica UFPS.	138
13.1.2	Evento Científico: V Encuentro Internacional De Innovación Tecnológica.	138
13.1.3	Evento Científico: 5th International Week Of Science, Technology & Innovation.	139
13.1.4	Evento Científico: Iii Encuentro De Semilleros De Investigación – UNAD.	140

13.2	Producto Generación De Nuevo Conocimiento	140
13.2.1	Revista Especializada: Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada.	140
14	Recomendaciones	142
	Referencias Bibliográficas	143
	Anexos	148