



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO**

TEMA:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PID
PARA LA PRESIÓN DE UN ELECTROLIZADOR EN UNA
TERMOELÉCTRICA**

AUTORES:

**Koeller Noboa, Christian Henry
Alcívar Balda, Jose Eduardo**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO
Mención en Gestión Empresarial

TUTOR:

Zamora Cedeño, Néstor Armando

**Guayaquil, Ecuador
2014**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **CHRISTIAN HENRY KOELLER NOBOA Y JOSE EDUARDO ALCIVAR BALDA**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL**.

TUTOR

Ing. Nestor Zamora

REVISORES

Ing. Pedro Tutiven

Ing. Judith Galvez

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Armando Heras

Guayaquil, marzo del año 2014



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **José Eduardo Alcívar Balda** y **Christian Henry Koeller Noboa**

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de **Titulación Diseño e implementación de un controlador PID para la presión de un electrolizador en una Termoeléctrica** previa a la obtención del Título de **Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, marzo del año 2014

LOS AUTORES

José Eduardo Alcívar Balda

Christian Henry Koeller Noboa



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **José Eduardo Alcívar Balda** y **Christian Henry Koeller Noboa**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Diseño e implementación de un controlador PID para la presión de un electrolizador en una Termoeléctrica** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, marzo del año 2014

LOS AUTORES:

José Eduardo Alcívar Balda

Christian Henry Koeller Noboa

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres por estar siempre ahí en todo momento, mostrando su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera.

A todas las personas que colaboraron con datos e información para el proyecto haciendo posible el desarrollo del mismo.

A mis tíos gracias por todo su apoyo y colaboración brindada durante toda la carrera (J.A).

JOSE ALCIVAR

CHRISTIAN KOELER

DEDICATORIA

A nuestros padres por estar siempre ahí en todo momento, mostrando su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera.

A todos los profesores que formaron parte de la carrera guiándonos hasta el fin de nuestra meta.

JOSE ALCIVAR

CHRISTIAN KOELER

Índice general

Índice general	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
Introducción	1
Planteamiento del problema	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Estructura del trabajo de Titulación	3
Capítulo 1	5
Marco Teórico.....	5
1.1 Tendencias actuales en producción y consumo de energía	5
1.2 Métodos tradicionales de generación de energía	7
1.2.1 Las centrales termoeléctricas.....	7
1.2.2 Consecuencias de la producción energética para el medio ambiente.....	7
1.3 Alternativas para sustituir los combustibles tradicionales	8
1.3.1 Panorama de los tipos de energía renovable actuales	8
1.3.2 Energía solar.....	9
1.3.3 Energía del viento. Eólica.....	10
1.3.4 Energía del mar.....	11
1.4 Energías renovables en el Ecuador	13
1.5 El hidrógeno como combustible del futuro.....	14
1.6 Retos para el futuro en el aprovechamiento del hidrógeno	15
1.7 Elementos de una estación para aprovechar energía renovable.....	17
1.7.1 Celda de combustible.....	17
1.7.2 Tipos de celdas de combustible.	18
1.7.3 Reacción electroquímica	18
1.7.4 Componentes de la pila combustible.....	18
1.8 Depósito de Hidrógeno	19
1.8.1 Formas de almacenamiento del hidrógeno.....	20

1.8.2	Ventajas de los hidruros metálicos	21
1.8.3	Sistemas comerciales de aprovechamiento del hidrogeno	21
1.9	Electrolizador de agua	23
1.9.1	Principio de funcionamiento del electrolizador.....	23
1.9.2	Producción mundial de hidrógeno	24
1.10	Baterías	24
1.10.1	Tipos de baterías	25
1.11	Control de Procesos.....	26
1.11.1	Elementos Constituyentes de los Sistemas de Lazo Cerrado.....	26
1.11.2	Control Proporcional Integral Derivativo (PID).....	27
1.11.3	El Controlador de Tres Términos.....	28
1.11.4	Características de los controladores P, I, y D.....	28
1.12	Método de ajuste de controlador PID. Método de Ziegler Nichols.....	31
1.12.1	Método de oscilación de Ziegler-Nichols	31
1.12.2	Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols	32
Capítulo 2	34
Marco metodológico	34
2.1	Tipo de investigación	34
2.2	Universo y muestra	34
2.3	Métodos.....	34
2.3.1	Métodos teóricos.....	35
2.3.2	Métodos empíricos.....	36
2.4	Variables.....	36
2.4.1	Operacionalización de variables:.....	36
2.5	Análisis e interpretación del instrumento aplicado en el diagnóstico de necesidades.....	38
Capítulo 3	40
Estudio de modelos de electrolizadores.....		40
3.1	Modelo termodinámico de un electrolizador	40
3.1.1	Voltaje Reversible y Termoneutro	41
3.2	Modelo electroquímico	42
3.2.1	Curva de voltaje – corriente del electrolizador	42

3.3 Flujo o caudal de hidrógeno.....	46
3.4 Estrategias de control de un sistema de aprovechamiento de energías renovables.	48
3.4.1 Estrategia de control para el sistema	49
3.4.2 Definición de variables de control.....	50
3.5 Control automático del electrolizador	51
Capítulo 4	54
Diseño de simulador del control de nivel en un electrolizador.....	54
4.1 Concepto de simulador y su aplicación en este trabajo.....	54
4.2 Importancia de los simuladores en la enseñanza – aprendizaje de las tecnologías de control de procesos	55
4.3 Diseño del equipo simulador.....	55
4.3.1 Almacenamiento de líquido dentro del electrolizador.....	55
4.3.2 Entradas y salidas del modelo electrónico para el nivel de líquido	56
4.3.3 Indicador de nivel en el electrolizado.....	57
4.3.4 Límites de nivel máximo y mínimo.....	59
4.3.5 Detección de límites máximos y mínimos de nivel.....	61
4.4 Simulación de la dinámica del electrolizador	62
4.4.1 Alimentación de potencia eléctrica	62
4.4.2 Simulación de la energía suministrada por la fuente de energía renovable	62
4.4.3 Convertidor de voltaje a corriente.....	64
4.4.4 Limitación de corriente máxima al valor nominal de diseño	65
4.4.5 Circuito convertidor de voltaje a frecuencia	66
4.5 Construcción del simulador	69
Conclusiones	72
Recomendaciones	74
Glosario de términos.....	75
Bibliografía.....	78
ANEXOS	83
Anexo 1. Encuesta dirigida a: Egresados de la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo.....	84

Anexo 2. Panel del simulador sin incluir los elementos para control manual y automático.....	87
Anexo 4. Señales de control para contadores.....	89
Anexo 5. Detección de niveles límites y alarma audible.....	90
Anexo 6. Circuito de entrada y simulación de curva V-I.	91

Índice de figuras

Figura 1.1 Campo de energía fotovoltaica, utilizando paneles solares.....	9
Figura 1.2. Estaciones solares térmicas. Se muestran colectores del tipo de concentradores distribuidos	10
Figura 1.3 Campo eólico en el mar para aprovechar la energía en la República de Dinamarca.....	11
Figura 1.4. Estación oleo motriz OPT-350 de la firma Ocean Power Technologies Inc.....	12
Figura 1.5.Ingenio Pelamis, capaz de generar 1MW a partir de la energía de las olas.	13
Figura 1.6. Parque eólico Villonaco en la provincia de Loja.	14
Figura 1.7. Etapas involucradas en la Tecnología del Hidrógeno. Sustento necesario en el conocimiento científico-tecnológico.....	17
Figura 1.8 Esquema de una celda de combustible.....	19
Figura 1.9 Celda combustible HYDROPAK, producida y comercializada por la firma Horizont.	22
Figura 1.10 Banco de baterías para compensar excesos y defectos de energía instantáneos.	25
Figura 1.11 Esquema de un sistema de control automático o de lazo cerrado..	26
Figura 1.12 Respuesta a un escalón de un control proporcional puro, donde se observa el error estacionario u offset. Fuente: Confeccionado por autores.....	26
Figura 1.13 Control PID, que mejora la rapidez en la respuesta a un disturbio.....	30
Figura 1.14 Control PID, que mejora la rapidez en la respuesta a un disturbio. Fuente: Confeccionado por autores.....	30
Figura 1.15 Curva de respuesta normalizada para el ajuste de los parámetros de un controlador PID.	33
Figura 3.1. Curva de Densidad de Corriente vs Voltaje de celda de un electrolizador comercial.	45

Figura 3.2 Relación entre el voltaje termo neutro y reversible con la temperatura.	46
Figura 3.3 Curva que representa la Eficiencia de Faraday vs densidad de corriente Intensidad en el electrolizador.	47
Figura 3.4 Esquema de un sistema con aprovechamiento de energías renovables.	48
Figura 3.5 Control de la potencia de entrada al electrolizador.....	53
Figura 4.1 Diagrama de bloques de las entradas y salidas principales del electrolizador. Fuente: Confección por autores.	57
Figura 4.2 Diagrama del circuito contador 74190/74191.	58
Figura 4.3 Relación entre voltaje de entrada del electrolizador de 3 celdas y la densidad de corriente.	64
Figura 4.4 Reducción de la curva a tres líneas rectas que la representan.	65
Figura 4.5 Placa del generador de pulsos controlado por voltaje en construcción.	70
Figura 4.6 Placa del contador bidireccional durante el proceso de construcción del prototipo... ..	70
Figura 4.7 Placa de entrada y simulador de curva V-I.....	71

Índice de tablas

Tabla 1.1 Tipos de celdas combustibles.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 1.2 Parámetros de controladores PID con el método de oscilación de Ziegler – Nichols.....	31
Tabla 3.1 Parámetros obtenidos empíricamente para la razón V-I del electrolizador.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.1 Relación de voltaje en electrolizador de tres celdas con la densidad de corriente en el electrólito.....	63
Tabla 4.2 Análisis de las posibilidades de variables de entrada para la señal UPDOWN (Dirección del conteo)	67

RESUMEN

Se realizó una investigación exploratoria en la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, con el objetivo general de proponer herramientas didácticas que permitan el desarrollo de contenidos relacionados con la automatización de plantas de aprovechamiento de energías renovables, enfocadas desde la perspectiva de un Ingeniero en Electrónica, Control y Automatismo. Al universo de estudio le corresponden 21 graduados del periodo 2012-2013, seleccionándose una muestra por criterio de juicio de 8 graduados, a los cuales se les aplicó instrumentos que permitieron diagnosticar la necesidad de la presente investigación. Entre los principales resultados del instrumento se encuentra que los estudiantes consideran necesario el aprendizaje de tecnologías para aprovechamiento de energías renovables y su automatización. En el trabajo se realiza una revisión bibliográfica relacionada sobre el tema de aprovechamiento de energías renovables. Se analizan modelos matemáticos de electrolizadores. Se identifican variables importantes para su control. Fue diseñado un simulador de electrolizador simplificado que representa una herramienta didáctica para prácticas de laboratorio en la actividad docente de la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo. Se concluye expresando la necesidad de divulgar más sobre estas tecnologías ecológicas que representan la tendencia del futuro, recomendándose desarrollar contenidos afines a las tecnologías que aprovechan energías renovables y utilizar el simulador en las actividades prácticas.

Palabras Claves: Energías renovables automatización electrolizador hidrógeno

ABSTRACT

Exploratory research was done at the Faculty of Technical Education for Development, with the general objective of proposing didactic tools that enable the development of content related to the automation of plants using renewable energies, focused from the perspective of an engineer in Electronics, Control and Automation. The universe of study was 21 graduates of the 2012-2013 period, a sample selected by criteria of judgment of 8 graduates, to which was applied instruments that let to diagnose the need for this research. The main result of the instrument is that it is considered necessary for students learning technologies to take advantage of renewable energy and its automation. In this work, a literature review was done related work to the subject of use of renewable energies. Electrolyzer mathematical models are analyzed. Important variables are identified for control. It was designed a simplified simulator for an electrolyzer, representing an educational tool for laboratory practice in teaching at the career of Electronic Engineering and Automation Control. It concludes by stating the need to disclose more about these ecological technologies, representing the trend of the future, recommending related to develop contents related to technologies that use renewable energy and use the simulator in practical activities.

Keywords: Renewable energy automation hydrogen electrolyzer

Introducción

En el mundo actual es cada vez más importante la búsqueda de alternativas más racionales para la obtención de energía. La quema de combustibles fósiles y sus derivados en plantas industriales y automóviles conlleva la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, que acelera el calentamiento global actual, debido a la retención del calor del sol en la atmósfera (efecto de invernadero), provocando un aumento de la temperatura promedio del planeta. Estos sucesos comprometen la supervivencia de todos los seres que habitan el planeta. (International Energy Agency, 2013)

Después de la generalización del uso del petróleo y el carbón, las fuentes naturales de energía limpia se vieron sustituidas nuevamente hoy, se piensa en aumentar su uso. Según previsiones de la Agencia Internacional de Energía, la proporción de las energías renovables no hidráulicas llegará a alcanzar el 15% en 2035. Esto representa una tendencia a construir un entorno energético más seguro, confiable y sostenible.

La eficiencia en el uso final de la energía es el elemento que contribuye en mayor medida a la reducción de emisiones de CO², representando más de la mitad del ahorro total. Las inversiones para lograr mayor eficiencia en la industria, en transporte y edificios tienen periodos de amortización cortos apropiados para el escenario actual, por lo que las inversiones en este ámbito deben de ir de la mano con las inversiones en cuestiones de evolución energética. (International Energy Association, 2013)

Se espera que la demanda mundial de electricidad se incremente más que otras energías de uso final. La generación de electricidad atraviesa por un periodo de transformación a medida que la inversión se destina hacia tecnologías con bajas emisiones de carbono, como resultado de los precios más elevados de combustibles fósiles y políticas gubernamentales para aumentar la seguridad energética y disminuir las emisiones de CO². (Fierro, 2012)

En Ecuador, se acometen ambiciosos programas y proyectos destinados a hacer más eficiente el uso de la energía y a reducir las emisiones de gases a la atmósfera. El Ministerio de Electricidad y Energías Renovables impulsa varios proyectos, siendo gran parte de ellos de aprovechamiento hidráulico y un parque eólico. (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables , 2013) Por todo lo anteriormente planteado, se evidencia la necesidad de formar profesionales con conocimientos afines a esta temática, que al graduarse puedan desempeñar de forma autónoma trabajos de creación y mantenimiento de plantas que utilicen energías renovables, respondiendo así a las necesidades actuales y futuras de la sociedad.

Planteamiento del problema

En universidades del Ecuador se han realizado trabajos de diferente alcance, orientados a asimilar tecnologías de aprovechamiento de energías renovables, pero los autores de este trabajo perciben y comprueban que entre los estudiantes de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo existe poco o ningún conocimiento de las tecnologías referidas anteriormente, infiriendo que estos temas deben ser estudiados por los futuros Ingenieros.

Todo lo anteriormente expuesto conduce a los autores de este trabajo de titulación a identificar el siguiente problema científico:

“En la Carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo, no se desarrollan contenidos relacionados con la automatización en plantas de generación con energías renovables”

Por lo que se hace necesario plantear un objetivo general y objetivos específicos que conduzcan a la solución del problema planteado:

Objetivo general

Diseñar e implementar una herramienta didáctica que permita el desarrollo de contenidos relacionados con la automatización de plantas de aprovechamiento de energías renovables, enfocadas desde la perspectiva de un ingeniero en Electrónica, Control y Automatismo.

Objetivos específicos

1. Realizar sistematización teórica sobre instalaciones industriales de generación de energías que utilicen fuentes renovables.
2. Aplicar instrumentos de la investigación.
3. Seleccionar ecuaciones básicas del balance electroquímico y termodinámico de un electrolizador.
4. Identificar variables de control necesarias para la operación segura de un electrolizador.
5. Diseñar simulador electrónico didáctico que modele el nivel de líquido en el electrolizador utilizando varias variables de control.

Estructura del trabajo de Titulación

Este presente trabajo de tesis se estructura de la siguiente forma: Introducción, Capítulo I, Marco teórico, donde se analiza la bibliografía para conocer el estado del arte en el aprovechamiento de energías renovables y las experiencias en automatización en el mundo y en Ecuador. El Capítulo II es el marco metodológico. El capítulo III profundiza en el estudio de los modelos matemáticos y termoquímicos de electrolizadores, para identificar los parámetros más importantes desde el punto de vista del control de procesos. En el capítulo IV se describen los principales aspectos tomados en cuenta del modelo matemático, para diseñar un simulador didáctico que imite el comportamiento del nivel de líquido en el electrolizador y su relación con otras variables. Se arriban a conclusiones y recomendaciones. Los

anexos contienen instrumentos de la investigación. Figuras y diagramas circuitales desarrollados para cumplir los objetivos del trabajo.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Tendencias actuales en producción y consumo de energía

La disminución de los recursos naturales fósiles utilizados actualmente para generar energía y el aumento de su consumo, trae como consecuencia su inevitable agotamiento para las futuras generaciones humanas. También es un gran problema el aumento de la contaminación producida en la atmósfera y en los diferentes ecosistemas del planeta por la extracción, procesamiento, transporte y utilización de los combustibles tradicionales no renovables. (International Energy Agency, 2013)

En el informe anual de la Organización Internacional de la Energía se hacen algunos planteamientos en forma de preguntas, que se reproducen a continuación. Las respuestas a las preguntas formuladas permiten tener una idea de las preocupaciones de los países en torno a la energía y de los esfuerzos que se hacen.

- En un mundo en que las grandes diferencias regionales en el precio de la energía inciden en la competitividad, ¿quiénes son los posibles ganadores y perdedores?
- Se necesita una enorme cantidad de petróleo para satisfacer la creciente demanda y compensar el declive de la producción en los yacimientos existentes. ¿De dónde vendrá?
- ¿Qué podría impulsar una rápida convergencia de los precios del gas natural en Asia, Europa y Norteamérica, y cómo afectaría esto a los mercados de la energía?
- ¿Es el incremento de la energía renovable auto sostenible y suficiente para ponernos en la senda del cumplimiento de los objetivos climáticos a nivel mundial?

- ¿Cuánto se está progresando en la eliminación progresiva de las subvenciones a los combustibles fósiles y en la expansión del acceso a servicios de energía modernos para los pobres del mundo? (International Energy Association, 2013)

En el panorama actual existen hechos que caracterizan los cambios de esta época. Los principales a juicio de estos autores son:

- La demanda de energía se desplazó hacia las economías emergentes, principalmente China, India y Oriente Medio con 1/3 de la utilización mundial de la energía.
- Reducción de las importaciones de Estados Unidos por la sustitución con recursos nacionales. Tiende a autoabastecerse para 2035
- Países como Brasil han tenido éxito para aumentar su producción de energía y combustibles principalmente explotando yacimientos en aguas profundas, manteniendo bajos los índices de contaminación y alcanzando altos índices de eficiencia.
- Tendencia a amortiguar el impacto de los elevados precios del combustible mediante el aumento de la eficiencia, expresada en el uso de tecnologías de punta para generación de transporte de energía, uso de recursos renovables, uso de dispositivos y equipos cada vez más ahorrativos y luchar por eliminar los subsidios a combustibles fósiles.
- Se generan las dos terceras partes de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero al producir energía, siendo esto más que el límite fijado. Se espera un aumento de temperatura promedio de 3.6°C en la atmósfera mayor que el de 2°C fijado en los acuerdos internacionales.
- En los próximos 10 años se espera que nuevas técnicas de extracción permitan volver a explotar yacimientos agotados.

- Se espera que los recursos eólicos y solares aumenten su competitividad y sean responsables de un porcentaje cada vez mayor de energía producida.

1.2 Métodos tradicionales de generación de energía

1.2.1 Las centrales termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas convencionales producen energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel oíl o gas en una caldera con agua que se convierte en vapor, utilizado para hacer trabajo útil en una turbina acoplada a un generador de energía eléctrica.

Una central termoeléctrica clásica tiene sitios de almacenamiento del combustible que utiliza para asegurar su disponibilidad. En el caso de carbón y combustibles sólidos se pulverizan estos para garantizar eficiencia en la combustión. En el caso de utilizar fuel-oíl, éste se precalienta para que sea fluido y se inyecta en quemadores diseñados para este combustible. (García, 2012).

1.2.2 Consecuencias de la producción energética para el medio ambiente

Estas centrales afectan el medio ambiente por la emisión de residuos a la atmósfera y gas carbónico. Además, calientan las aguas de ríos al utilizar estas para la refrigeración en circuito abierto.

Las nuevas tecnologías tratan de minimizar el daño al entorno natural incorporando sistemas de purificación y enfriamiento para afectar lo mínimo al ambiente. Las plantas de gas son las menos contaminantes, seguidas por las de fuel oíl, siendo las plantas a base de carbón las más contaminantes. Debido a que en su combustión se emiten al medio ambiente partículas y ácidos de azufre. Esto se contrarresta con chimeneas altas provistas de filtros electrostáticos y precipitadores para retener lo más posible las impurezas.

1.3 Alternativas para sustituir los combustibles tradicionales

El interés por las energías renovables aumenta gradualmente en todo el mundo. El aprovechamiento de la energía solar, eólica, biomasa es una prioridad en muchos países. Estas energías tienen la característica de que pueden generar energía eléctrica, pero no se pueden almacenar como los combustibles fósiles y tampoco se puede estimar con facilidad que cantidad de energía se producirá, ya que la generación depende del comportamiento de cada recurso natural usado. Es necesario por ello resolver el problema del almacenamiento y transporte de la energía para usarla fácilmente en automóviles y aprovechar al máximo la energía procedente de fuentes renovables cuando se disponga del recurso y consumirla cuando la demanda lo indique.

1.3.1 Panorama de los tipos de energía renovable actuales

Las energías renovables, son las que se obtienen de fuentes naturales inagotables, debido a su regeneración constante o por el gran poder energético que tienen. Al aprovechar estas energías no se produce ningún residuo dañino ni contaminante.

El Sol es en el origen de toda la energía en el planeta, tanto renovable como no renovable. Su calor provoca gradientes de presión en distintas zonas de la Tierra, dando origen a los vientos, que es la fuente de la energía eólica. El Sol provoca el ciclo del agua en la atmósfera, causando la evaporación y formación de nubes, que se precipitarán en forma de lluvia. También del Sol procede la energía mareomotriz. Las plantas convierten mediante la fotosíntesis la energía del sol en biomasa. También directamente, la energía se aprovecha con las modalidades térmicas y fotovoltaicas. (Holgado Secas, 2012).

Las energías renovables eran muy utilizadas antes de la revolución industrial, en que se potenció el uso del carbón y el petróleo después.

1.3.2 Energía solar

Esta energía es limpia, no contamina y no se agota, por lo que actualmente se investiga mucho sobre ella. El sol provee 4000 veces la energía que necesita la humanidad y actualmente no se aprovecha lo suficiente porque el nivel tecnológico actual no es suficiente para hacerlo y porque los precios de la tecnología son altos. La energía solar tiene la desventaja de que no es continua, es decir, varía según la época del año y el tiempo.

La energía solar se aprovecha como energía solar térmica y energía solar fotovoltaica.

En la figura 1.1 se presenta una estación de energía fotovoltaica, que aprovecha el efecto fotoeléctrico, o foto detección cuántica de un dispositivo semiconductor o célula fotovoltaica.

Con esta energía se pueden alimentar aparatos autónomos, abastecer refugios o casas aisladas y producir electricidad para redes de distribución.

La corriente eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna mediante un inversor y posteriormente se inyecta en la red eléctrica.



Figura 1.1 Campo de energía fotovoltaica, utilizando paneles solares.
Fuente: (Durán Leirado, 2007)

La energía solar térmica consiste en captar el calor del sol para hacer un trabajo útil, que generalmente es mover un generador eléctrico con vapor de agua producido al concentrar los rayos del sol en un punto, en el cual se

pueden medir temperaturas de 300 °C a 1000 °C. Se han desarrollado muchas variantes que tienen en común la concentración de energía en una zona pequeña mediante la reflexión con espejos enteros o distribuidos. En la figura 1.2 se muestran concentradores distribuidos.



Figura 1.2. Estaciones solares térmicas. Se muestran colectores del tipo de concentradores distribuidos
Fuente: (Claneco S.A Chile, 2013)

1.3.3 Energía del viento. Eólica

En distintos lugares del mundo se desarrollan parques eólicos en tierra y en el mar. El país que encabeza este desarrollo es Dinamarca, que genera gran parte de su energía con este método, siendo actualmente este valor 28%. Dinamarca planea para el año 2050 tener el suministro del 50% de su energía con fuentes eólicas (Ministerio de Relaciones Exteriores de Dinamarca, 2013). El autor de este trabajo considera que con esta política, además de prepararse para el futuro, se cuida el ambiente, se ahorra energía no renovable y genera empleos seguros para las personas del país. En la figura 1.3 se muestra un campo eólico en el mar de la República de Dinamarca.



Figura 1.3 Campo eólico en el mar para aprovechar la energía en la República de Dinamarca.

Fuente: (rescompass.org, 2012)

La energía cinética del viento se captura y transforma en energía mecánica de las aspas del aeromotor. Estas máquinas eólicas pueden de convertir la energía del viento en energía mecánica de rotación utilizable, para accionar directamente las maquinas o producir energía eléctrica. El sistema de conversión, con un generador eléctrico con sus sistemas de control y conexión a la red, se conoce como aerogenerador. Estos ingenios se agrupan en parques o campos eólicos para hacer rentable su instalación. Se pueden utilizar tierras áridas, desiertos o mares para su instalación.

1.3.4 Energía del mar

La energía del mar se aprovecha con diferentes tipos de estaciones, siendo las principales:

- **Energía de las mareas o mareomotriz:** El nivel del mar cambia producto de la interacción de la Tierra y la Luna. La elevación o descenso de este se aprovecha para generar energía.
- **Energía de las corrientes:** Las corrientes marinas son una fuente estable de energía que no se aprovecha mucho. Son conocidas las corrientes cálidas y frías que recorren distintas zonas del planeta.
- **Energía maremotérmica:** Aprovecha la diferencia de temperaturas existente en zonas tropicales y ecuatoriales entre las aguas superficiales que tienen 25°C a 30°C y las aguas profundas que

tienen 2 °C a 4 °C. Se pueden utilizar líquidos con puntos de ebullición adecuados para hacer un trabajo útil y después enfriarse en la profundidad.

- Energías de las olas o undimotriz: Esta energía está presente en todos los mares y puede ser aprovechada con la tecnología adecuada. Se utilizan boyas ancladas en el fondo del mar, las cuales se mueven con las olas, también se utilizan flotadores. La firma Ocean Power Technologies Inc, comercializa ya una estación generadora, capaz de suministrar continuamente 350W de energía con picos de 1600W. En la figura 1.4 puede apreciarse el ingenio APB-350 de la firma OPB. (Ocean Power Technologies Inc, 2013)
- Energía del gradiente salino (osmótica).



Figura 1.4. Estación oleo motriz OPT-350 de la firma Ocean Power Technologies Inc.

Fuente: (Ocean Power Technologies, 2011)

Otro ejemplo del uso de energía oleo motriz es el proyecto *Pelamis*. Una empresa británica Pelamis Wave Power Ltd, especializada en energía oleo motriz desarrolló un ingenio flotante, similar a una serpiente, el mismo que está articulado y el movimiento de las olas en la superficie se utiliza para generar energía y transmitirla a tierra. Un sistema *Pelamis* está diseñado para generar 1 MW de energía. Se sitúan a 1 o 2 Km en mar abierto. Pueden en un año generar 2.9GWH de energía, suficiente para abastecer 700 casas. (Pelamis Wave Power Ltd, 2013)

En la figura 1.5 se muestra un ingenio Pelamis en el mar del Norte.



Figura 1.5. Ingenio Pelamis, capaz de generar 1MW a partir de la energía de las olas.

Fuente: (Pelamis Wave Power, 2013)

1.4 Energías renovables en el Ecuador

En Ecuador, el gobierno, a través de su Ministerio de Electricidad y Energías Renovables impulsa varios proyectos, siendo gran parte de ellos de aprovechamiento hidráulico. Existen publicados 8 proyectos hidroeléctricos y un parque eólico. (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables , 2013)

Dos proyectos hidroeléctricos son:

Proyecto Coca Codo Sinclair: Este proyecto está bajo la responsabilidad de la empresa SINOHYDRO. Se proyecta construir una hidroeléctrica capaz de generar 1.500 MW de potencia efectiva con una producción de energía de 8.731 GWh/año.

Proyecto hidroeléctrico Toachi – Pilatón, situado en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi con una producción de energía de 1.120 GWh/año equivalente al 6,07 por ciento de la demanda nacional con una potencia de 253 MW. Beneficiará a 3 millones habitantes con cobertura de servicio eléctrico.

El proyecto eólico es llamado Villonaco y está en la provincia de Loja. Se pretende beneficiar a 449000 personas con la construcción y explotación de parque eólico que sustituya la generación de energía con combustibles fósiles, Tiene 11 aerogeneradores que suministrarán 59GW-h/año de energía eléctrica limpia y 16.5 MW de potencia.

En la figura 1.6 se muestra el proyecto eólico Villonaco en Loja.



Figura 1.6. Parque eólico Villonaco en la provincia de Loja.
Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables , 2013)

1.5 El hidrógeno como combustible del futuro

El hidrogeno es un candidato atractivo para cumplir la tarea de suministrar la energía en el futuro. No se encuentra en la naturaleza de forma libre, pero puede producirse con energía eléctrica. Al ser elaborado puede almacenarse en forma de gas, liquido, en superficies solidas o formando parte de sólidos o compuestos. Finalmente, el hidrogeno se reconvierte a energía eléctrica o térmica en una celda combustible u oxidándose. En todo el proceso la eficiencia es del 40%, o sea, la fracción de energía obtenida a partir de la energía suministrada es de 10:4, no obstante, esa eficiencia es mayor que los procesos de generación de energía actuales mediante combustible fósiles.

Para producir hidrogeno con fuentes renovables, el método más utilizado es la electrolisis del agua, que se descompone en oxigeno e hidrogeno. Hoy esta técnica es cara, no obstante, se investiga sin cesar, a fin de lograr tecnologías viables que sustituyan el uso de combustibles fósiles.

El almacenamiento de hidrogeno que más se investiga en la actualidad es en depósitos que aprovechan su reacción química reversible formando hidruros. De esta forma se puede aumentar la densidad de energía por unidad de volumen con presiones y temperaturas moderadas.

Por su parte, el hidrógeno almacenado puede convertirse en energía en una reacción reversible. Se logra alta eficiencia haciendo el proceso inverso a la electrolisis, combinando de nuevo el hidrogeno y el oxígeno en una celda combustible. El resultado es agua y energía eléctrica.

Muchas empresas y fundaciones investigan sobre este revolucionario tema. La investigación a escala de laboratorio es efectuada por universidades, fundaciones y centros especializados. Este trabajo conllevará en los próximos años a obtener sin duda métodos más eficientes de generación y almacenamiento y con menos costo, de forma que la barrera que existe hoy por los precios prohibitivos caiga finalmente y pueda disponerse de energía limpia.

La introducción actual del hidrogeno es un proceso gradual, que depende de los logros de las investigaciones que se realizan. Es por eso que se buscan alternativas para producir energía en el futuro cercano.

La opción más atractiva en la actualidad consiste en sustituir un sistema energético basado en combustibles fósiles por otro basado en hidrógeno. Para que este reemplazo sea posible, hay que resolver algunos aspectos técnicos involucrados en cada una de las etapas asociadas al empleo del hidrógeno, la generación, adecuación, transporte, almacenamiento y el diseño de los dispositivos que lo aprovechen como combustible. Aunque la máxima atención y esfuerzo se concentra actualmente en el desarrollo de los dispositivos generadores de energía a partir del hidrógeno (quemadores eficientes y celdas combustibles), en cada una de estas etapas existen objetivos de investigación donde la aplicación de los desarrollos científicos puede lograr la generación de productos con gran impacto económico.

1.6 Retos para el futuro en el aprovechamiento del hidrógeno

Según los autores (Meyer, Caneiro, Corso, Ponce, & Azcona, 2004) , para lograr aprovechar el hidrogeno se necesita resolver los siguientes problemas:

- Desarrollo de métodos económicos para obtener hidrógeno de las fuentes que lo contienen como: agua, biomasa, hidrocarburos y fuentes secundarias.
- Desarrollo de técnicas más económicas para adecuar la pureza del gas a las necesidades de los dispositivos que lo utilizan.
- Invención de sistemas seguros y eficientes para la compresión del hidrógeno en cada una de las escalas y rangos requeridos en las aplicaciones.
- El desarrollo y adecuación de sistemas móviles como cisternas y estáticos como ductos, para el transporte del hidrógeno desde los centros de producción a los de consumo.
- Desarrollar sistemas de almacenamiento más eficiente para cada necesidad, cumpliendo las normas de seguridad y conveniencia de cada aplicación. Los sistemas deben tener temperaturas y presiones adecuadas, altas velocidades de carga y descarga, alta densidad volumétrica.
- Desarrollar equipos y dispositivos necesarios para las aplicaciones existentes con la disminución del menor costo o mejora de prestación frente a las fuentes existentes. Estos equipos pueden ser principalmente:
 - Quemadores eficientes para calefacción por combustión.
 - Baterías recargables con mayores potencias y energía almacenada por unidad de volumen y masa.
 - Celdas combustibles capaces de generar electricidad en los distintos usos: vehicular, domiciliario, residencial, industrial, etc.
- Desarrollar los conocimientos necesarios y nuevos materiales para prevenir y contrarrestar los daños que puede provocar la fragilización de partes de equipos por reacción con los componentes utilizados en estas tecnologías.

En la figura 1.7 se muestra resumido el ciclo de producción y uso del hidrógeno.

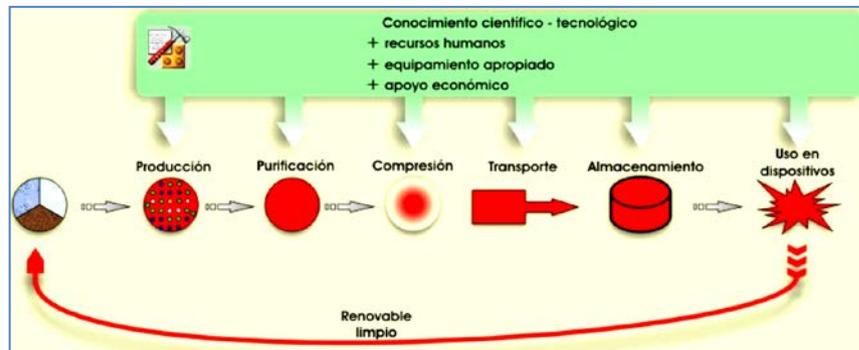


Figura 1.7. Etapas involucradas en la Tecnología del Hidrógeno. Sustento necesario en el conocimiento científico-tecnológico.
Fuente: (Meyer, Caneiro, Corso, Ponce, & Azcona, 2004)

Los beneficios que se obtendrían en la economía y en la conservación del medio ambiente, además de encontrar alternativas a los combustibles fósiles, son motivos fundamentales para justificar el esfuerzo que se realiza en los países desarrollados invirtiendo tiempo, conocimiento y recursos económicos para el desarrollo de materiales, procesos y dispositivos que contribuyan al empleo del hidrógeno como vector energético limpio.

1.7 Elementos de una estación para aprovechar energía renovable

Se describen a continuación algunos de los elementos que componen una estación que aproveche el hidrógeno.

1.7.1 Celda de combustible

Son dispositivos que generan energía eléctrica de un compuesto químico (combustible) que experimenta una reacción electroquímica sin producirse combustión. El resultado es la generación de un voltaje directo y agua. El combustible es oxidado en el ánodo y se reduce el comburente en el cátodo.

1.7.2 Tipos de celdas de combustible

En la tabla 1.1 se relacionan algunos tipos de pilas de combustible. Las pilas poliméricas son las más apropiadas para usar en sistemas como los que se tratan en este trabajo.

Celda combustible		Rangos de Temperatura	Eficiencia	Electrolito
Nombre	*Abreviatura	(°C)	(%)	
Alcalina	AFC	60 – 90	50 – 60	Solución acuosa de KOH (35–50%wt)
Acido fosfórico	PAFC	160 – 220	55 – 65	Ácido fosfórico concentrado
Carbonato fundido	MCFC	620 – 660	60 – 65	Carbonato fundido ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{NaCO}_3$)
Oxido sólido	SOFC	800 – 1000	55 – 65	Cerámica sólida ($\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$)
Membrana de polímero	PEMFC	50 – 80	50 – 60	Polímero ácido orgánico poli-perfluorosulfónico

Tabla 1.1 Tipos de celdas combustibles.
Fuente: (Colucci, 2009)

1.7.3 Reacción electroquímica

En cada electrodo de una pila de combustible se lleva a cabo una semirreacción. La suma de ambas semirreacciones proporciona la reacción global.

Así utilizando oxígeno, o aire, como comburente e hidrógeno, como combustible; mediante una pila de combustible es posible obtener energía eléctrica. El producto químico de la reacción es agua o vapor de agua, además de los reactivos que no hayan reaccionado.

1.7.4 Componentes de la pila combustible

Las pilas de combustible cuyo esquema aparece en la figura 1.8, se encuentran constituidas por varias celdas individuales conectadas eléctricamente en serie. Las celdas contienen una matriz con electrolito que se encuentra en contacto a cada lado con un electrodo, ánodo y cátodo.

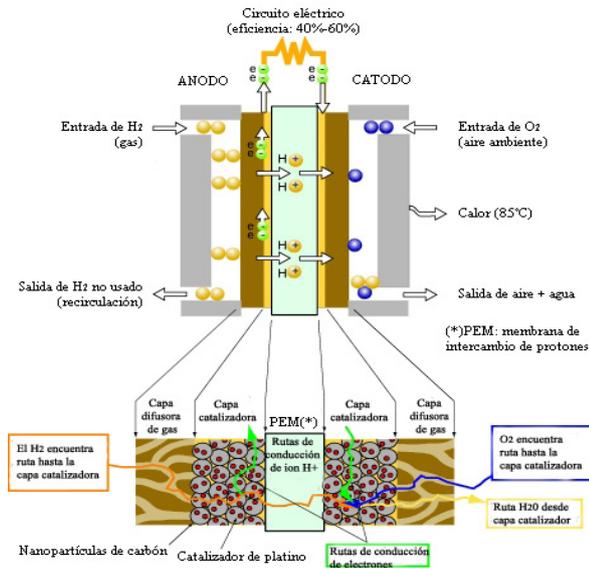


Figura 1.8 Esquema de una celda de combustible.
Fuente: (Gómez Cisneros, 2012)

Más recientemente, ha surgido un interés creciente por las aplicaciones de las pilas de combustible para propulsión principalmente en el sector del transporte urbano. Las normativas de reducción de emisión de contaminantes y de dióxido de carbono cada vez más estrictas que vienen entrando en vigor para las grandes ciudades, orientan el desarrollo de los automóviles hacia vehículos de propulsión eléctrica que presenten emisión nula o casi nula.

Las pilas de combustible, presentan un amplio espectro de aplicaciones en campos de gran actividad económica, que explican el interés y la implicación de los sectores industrial, eléctrica y gasista al nivel de la investigación, el desarrollo y la financiación de proyectos de esta tecnología.

1.8 Depósito de Hidrógeno

El depósito de hidrógeno responde a la necesidad de almacenar el hidrogeno producido con diferentes métodos de generación alternativa, en forma eficiente, segura y fácil de transportar.

Los sistemas de almacenamiento de hidrógeno pueden separarse en dos tipos según su movilidad:

Sistemas para usos estacionarios:

Son aquellos que harán su trabajo en un lugar fijo. Están destinados a emplearse en la generación de energía eléctrica y térmica en casas, industrias, lugares aislados o desconectados de la red eléctrica.

Sistemas para aplicaciones móviles:

El uso más destacado es en automóviles. Las investigaciones en este campo son intensas, porque el automóvil aporta gran parte de la contaminación ambiental actual.

1.8.1 Formas de almacenamiento del hidrógeno

Los sistemas para almacenar y transportar hidrógeno pueden clasificarse en función de su estado gaseoso, líquido o sólido. Para emplear sistemas de distribución a gran escala por viaductos, la tecnología debe estar desarrollada y los costes deben bajar a fin de que sea más barato distribuir la energía con hidrógeno conducido bajo tierra que con electricidad suministrada con cables aéreos.

Las formas de almacenar el hidrogeno son diversas, siendo las tres principales:

1. Almacenamiento de gas hidrógeno a presión en cilindros capaces de contenerlo.

En este caso, la baja densidad del hidrógeno representa una desventaja, pues se almacena menos energía por unidad de volumen comparada con otros gases o líquidos. Este almacenamiento requiere grandes volúmenes y altas presiones. Además los depósitos son pesados y voluminosos. También son costosos porque deben cumplir estándares de seguridad rigurosos para evitar accidentes.

2. Almacenamiento de hidrógeno líquido.

Es el almacenamiento criogénico, para el cual se necesitan muy bajas temperaturas. Su ventaja es que la energía se almacena a alta densidad,

siendo menor el peso del contenedor que en los otros métodos. Tiene como desventajas los problemas de seguridad y el gasto de energía para mantener el estado líquido del hidrogeno. Se utiliza en aplicaciones donde es importante minimizar el peso, como en las aplicaciones aeroespaciales.

3. Como hidruros metálicos. El hidrógeno se absorbe y desprende del hidruro contenido en el depósito, siendo la reacción reversible, pues el hidrógeno se combina y desprende del compuesto químico que está en el depósito.

1.8.2 Ventajas de los hidruros metálicos

Según el autor Holgado Secas, el almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido necesita de altas presiones en los depósitos de confinamiento que pueden ser peligrosas y obligan a mantener normas de seguridad en la confección de estos depósitos. La principal desventaja es lo voluminoso del almacenamiento.

A su vez, el almacenamiento líquido necesita de depósitos criogénicos, donde la limitante está en mantener muy bajas temperaturas. La desventaja principal en este caso es que el almacenamiento líquido es poco práctico en aplicaciones no industriales además de que es caro.

En esta coyuntura se considera el almacenaje en depósitos conteniendo hidruros metálicos que soslaya algunos de los inconvenientes anteriores y presenta un modo compacto, intermedio en peso, para el almacenamiento.

1.8.3 Sistemas comerciales de aprovechamiento del hidrogeno

Las pilas de combustible portátiles ofrecen el beneficio de larga duración, generación de energía eléctrica limpia en varias situaciones fuera de la red. Tienen ventajas sobre baterías de menor capacidad, baterías pesadas con plomo o pequeños generadores diesel que no se pueden usar en el interior de un local cerrado debido a sus humos tóxicos.

La firma inglesa Horizonte desarrolló celdas de combustible prácticas y comerciales, aunque de capacidad muy limitada. Tiene una consigna: “No esperar que la tecnología del hidrógeno se establezca, sino usarla ya”. La empresa brinda ya celdas para aplicaciones de bajo consumo. (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013)

Cada celda de combustible puede ser recargada con hidrógeno mediante dispositivos portátiles generadores a partir de agua destilada.

Como autor de este trabajo de diploma considero que aunque parezca “poco” el ahorro que representan estas celdas de combustible portátiles, la ganancia ambiental es muy alta, pues una celda como esta sustituye a 10 pilas secas de las que hoy se desechan y contaminan el ambiente. Además su vida útil es de 10 a 15 años y no se descargan. Se puede recargar 100 veces y cada vez que se recarga, rinde por 10 pilas. Por tanto, una celda como esta evita el consumo y desecho de 1000 pilas del tipo AA convencionales. Si se piensa en su uso masivo, 2W de energía en 1 millón de unidades vendidas representan 2 MW ahorrados, en energía producida con combustibles fósiles no renovables.

La versión *Hydropak* de pila combustible como la mostrada en la figura 1.9, puede suministrar 50W de energía. La misma es diseñada para su uso en situaciones de emergencia. También dispone de salidas de voltaje de 12V y 5V y la potencia nominal que brinda es de 50W.



Figura 1.9 Celda combustible HYDROPAK, producida y comercializada por la firma Horizont. (Ynovex Pty Ltd, 2013)

El *Hydropak* utiliza cartuchos de bajo costo y alta capacidad. Las celdas no se descargan durante años de almacenamiento, el costo de almacenamiento

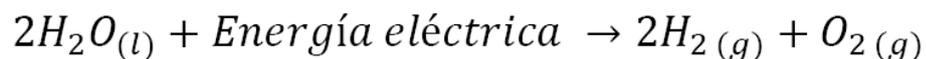
es más bajo que los productos equivalentes de batería de ácido y plomo. Por su parte, la celda de energía es *plug and play* y no existe necesidad de añadir agua. No almacena hidrógeno en el interior cuando no se utiliza, por lo que es fácil de llevar en cualquier lugar. El sistema puede funcionar en interiores sin emisiones nocivas, es más silencioso, más ligero y más pequeño que los generadores. El *Hydropak* es ideal para situaciones de emergencias o para acampar representa una solución al aire libre.

1.9 Electrolizador de agua

1.9.1 Principio de funcionamiento del electrolizador

El principio que rige el funcionamiento de un electrolizador es el mismo que rige el funcionamiento de una pila de combustible con la diferencia de que la reacción electroquímica se dará en sentido contrario. Por tanto será necesario aportar energía para separar dos moléculas de agua en dos moléculas de hidrógeno y en una molécula de oxígeno, esta energía se aporta en forma de energía eléctrica.

La expresión siguiente representa la ecuación química de la electrólisis del agua:



El descubrimiento de la electrólisis del agua fue en medio ácido, y posteriormente se fueron utilizando diferentes métodos como lo es en medio básico. Actualmente la electrólisis de agua en medio ácido se realiza mediante el uso de la tecnología de membrana polimérica de intercambio de protones en estado sólido (electrolizadores tipo PEM). Las semirreacciones implicadas en un electrolizador tipo PEM son las mismas que las que se llevan a cabo en una pila de combustible tipo PEM (expuesto anteriormente), pero en sentido inverso. La electrólisis mediante electrolizadores tipo PEM presenta como ventajas una mayor seguridad y fiabilidad al no existir un fluido en movimiento, una mayor pureza de los gases obtenidos, y una mayor densidad de corriente. Sin embargo, el empleo de electrólisis alcalina

conlleva menos costes de inversión que el empleo de electrolisis mediante PEM. La pureza del hidrógeno proporcionada por un electrolizador alcalino es más que suficiente para las necesidades requeridas tanto por los hidruros metálicos como por la pila de combustible.

El voltaje que se requiere entre el ánodo y el cátodo, así como los flujos másicos producidos de hidrógeno y oxígeno, son las características principales que definen el comportamiento de una celda del electrolizador. Un electrolizador alcalino bipolar consta de una serie de celdas conectadas eléctricamente en serie. El hidrógeno se genera en el cátodo. Los aniones hidroxilo (OH), generados en el cátodo, atraviesan la membrana porosa hasta llegar al ánodo donde se disocian moléculas de agua y de oxígeno (dos moléculas de agua y una de oxígeno por cada cuatro iones hidroxilos), cediendo electrones (dos electrones por cada molécula de agua generada). El oxígeno se escapa del compartimento anódico en forma gaseosa.

1.9.2 Producción mundial de hidrógeno

El 96% del hidrógeno se produce con materias primas fósiles, realizando reacciones químicas utilizando nafta y gas natural o gasificando el carbón.

Solo el 4% del hidrogeno se produce en electrolizadores. Las investigaciones en este sentido son crecientes y se prevé un aumento significativo, pues es considerado el combustible del futuro. Una opción es producir hidrógeno con electrolizadores usando electricidad producida con energías renovables.

Existen métodos de electrolisis a altas temperaturas (800-1000 grados Celsius) que se ensayan en diversos lugares del mundo, considerando que aportan la energía de reacción necesaria en forma de calor y electricidad.

1.10 Baterías

Una batería es un elemento acumulador eléctrico que almacena energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. Es un generador eléctrico

secundario. No produce energía eléctrica en sí, sino que libera la que anteriormente se ha almacenado durante su carga. El número de cargas y descargas vendrá limitado por su vida útil. Bancos de baterías como los de la figura 1.10 se encuentran en muchos lugares para almacenar energía.



Figura 1.10 Banco de baterías para compensar excesos y defectos de energía instantáneos.

Fuente: (Alaska Center for Energy, 2012)

La principal virtud de las baterías es la mayor densidad de energía que poseen frente a muchos otros almacenadores, pero tienen ciertas desventajas o restricciones. Las baterías se auto descargan con el tiempo debido a la resistencia de fuga. Un inconveniente no menos importante es la alta toxicidad de los metales pesados que forman parte de algunos tipos de baterías, que constituyen un problema medioambiental grave. Se está intentando reducir esta toxicidad sustituyendo con nuevas sustancias menos contaminantes.

1.10.1 Tipos de baterías

Entre los tipos de baterías existen de Plomo-Ácido, NaS, Ni-Cd, Ni-Mh, Li-ión y otras varias. Entre ellas, las baterías de plomo han sido las más desarrolladas y utilizadas en sistemas de potencia. El resto de baterías están siendo utilizadas en aplicaciones donde las restricciones de tamaño y peso son críticas. Las baterías de ión litio son las que mayores ventajas presentan, en cuanto a densidades de energía y potencia específica, eficiencia en el almacenamiento, mayor rendimiento en la descarga,

ausencia de efecto memoria, pero esos dispositivos son caros. Las baterías más utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía de fuentes de renovables (solar, eólica) son las baterías estacionarias. Son baterías de plomo-ácido de bajo contenido de antimonio. Estas baterías se comercializan en celdas unitarias de 2V, o en bancadas que suelen ser de 12V ó 24V.

1.11 Control de Procesos

El control automático es una especialidad muy importante. Permite humanizar el trabajo en las industrias y elevar su calidad y competitividad. Es imprescindible en sistemas robóticos o procesos modernos de fabricación.

También es esencial en el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, composición química en procesos de industrias transformadoras. Los sistemas de control automático son de lazo cerrado, pues monitorean la variable a controlar y la mantienen dentro de parámetros especificados mediante correcciones a alguna variable de control.

1.11.1 Elementos Constituyentes de los Sistemas de Lazo Cerrado

La figura 1.11 muestra los elementos de un sistema a lazo cerrado.

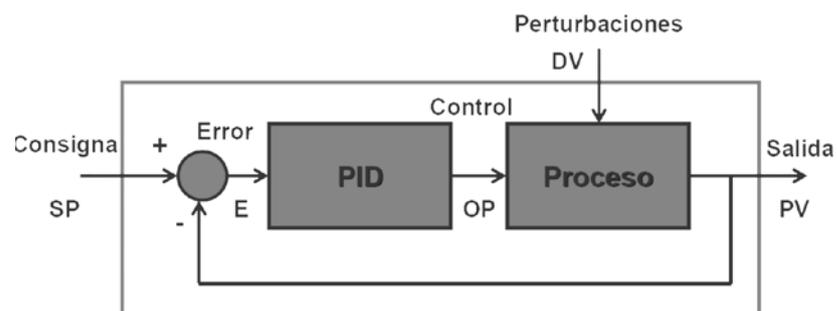


Figura 1.11 Esquema de un sistema de control automático o de lazo cerrado.
Fuente: Confeccionado por Autores.

Los elementos del sistema de control son:

- Variable controlada o Salida. Variable cuyo valor debe mantenerse igual a la consigna. Se necesita tomar una muestra de su comportamiento en el proceso y compararlo con el valor de referencia.
- Señal de retroalimentación. Es la salida del instrumento de medida que se compara con la consigna o set point.
- Valor de referencia o consigna. Es el valor deseado de la variable controlada.
- Detector de error. Compara el valor de referencia con el valor medido de la variable controlada ofreciendo una señal proporcional a su diferencia.
- Controlador. Es aquel que recibe la señal de error y elabora una señal para contrarrestar esta.
- Perturbación o disturbio: Es cualquier factor externo que cambia el valor de la variable de salida.

1.11.2 Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

Un controlador PID es un sistema de control que, mediante un actuador, es capaz de mantener una variable o proceso en un punto deseado dentro del rango de medición del sensor que la mide. Es uno de los métodos de control más frecuentes y precisos dentro de la regulación automática.

Actualmente, el controlador PID es aún el más ampliamente utilizado en la industria moderna, controlando más del 95 por ciento de los procesos industriales en lazo cerrado.

El control Proporcional Integral Derivativo es la solución ideal para sistemas de control que deseen corregir su respuesta tanto en el transitorio como en el régimen estacionario ofreciéndonos una gran libertad de acción al tener tres parámetros (K_p , K_i y K_d) con los que ajustar el lazo de control.

Un regulador PID tiene en cuenta el error, la integral del error y la derivada del error. Los valores de las constantes, que reciben el nombre de constante proporcional, integral y derivativa, definen el comportamiento del regulador.

1.11.3 El Controlador de Tres Términos

En el controlador PID la señal de error se trata con tres diferentes formas, empleándose integración, diferenciación respecto a t tiempo y multiplicación por una constante.

1.11.4 Características de los controladores P, I, y D

El control proporcional reduce el tiempo de elevación y reducirá, sin jamás eliminar, el error de estado estacionario.

Un control integral (K_i) elimina el error estacionario, pero puede empeorar la respuesta transitoria.

El control derivativo (K_d) incrementa la estabilidad del sistema, reduciendo el sobre pico y mejorando la respuesta transitoria.

1.11.4.1 Control Proporcional

El control proporcional representa que la acción de control sea un factor K_p multiplicado por la señal de error. Al ajustar el valor de K_p se trata que la respuesta de frecuencia sea amortiguada. Si K_p es muy grande el sistema oscila y se va de control. Si K_p se elige un poco alta, la respuesta oscila alrededor del punto deseado amortiguándose, teniendo un tiempo de establecimiento determinado. Las oscilaciones no deben exceder el 30% del valor controlado.

Si K_p es un poco baja, el sistema es estable y no oscila alrededor del valor deseado pero se mantiene un error conocido como offset.

Un control proporcional puro tiene un sobre impulso con oscilaciones amortiguadas o bien una respuesta sobre amortiguada, pero siempre tendrá un error. Todo depende del valor del ajuste de K_p . Es por eso que ha sido

necesario introducir acciones que consideren el tiempo, como las acciones integrales y derivativas.

En la figura 1.12 se puede apreciar la respuesta de un controlador Proporcional o tipo P a una variación en escalón de la entrada.

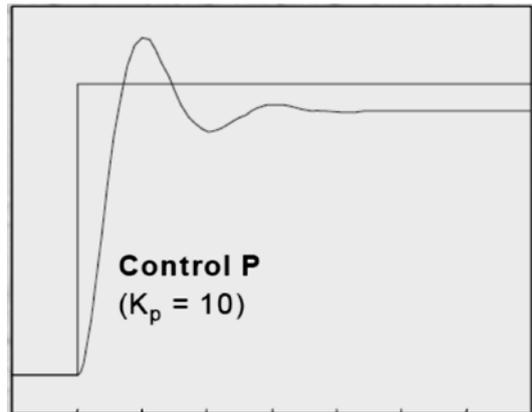


Figura 1.12 Respuesta a un escalón de un control proporcional puro, donde se observa el error estacionario u offset.

Fuente: Confeccionado por autores.

1.11.4.2 Control Integral

El modo Integral de control elimina el error en estado estacionario, característico del modo de control proporcional. El error se integra, promediando su valor, disminuyendo el offset. Se multiplica por la K_i (constante de integración).

No existen controles integrales exclusivamente, pero pueden encontrarse controladores PI. Cada control tiene su constante K_p y K_i que se ajusta independientemente.

En la figura 1.13 puede apreciarse la mejora en la respuesta de un control PI respecto al P.

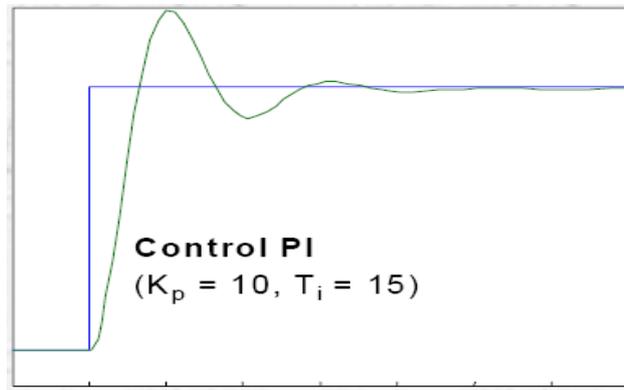


Figura 1.13 Control proporcional Integral. Reacción a una señal escalón.
Fuente: Confeccionado por autores.

1.11.4.3 Control derivativo

La acción derivativa se produce al existir cambios muy rápidos de la variable controlada. Se manifiesta anticipándose al cambio, corrigiendo el error o desviación del valor deseado, *set point* o consigna, a una velocidad muy rápida. Su expresión matemática es la derivada respecto al tiempo multiplicada por una constante K_d .

Se conocen los controles PD y PID, siendo los últimos los más usados (95%) de todos los sistemas son PID.

En la figura 1.14 se muestra la respuesta de un controlador con los tres tipos de acciones, P,I y D.

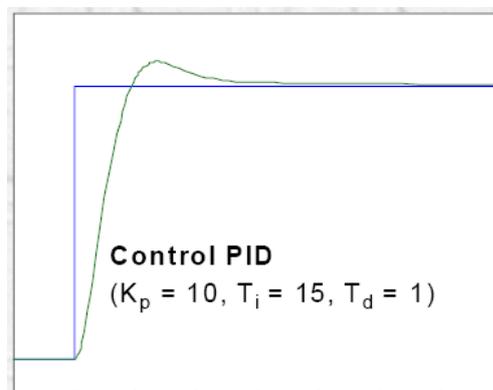


Figura 1.14 Control PID, que mejora la rapidez en la respuesta a un disturbio.
Fuente: Confeccionado por autores.

1.12 Método de ajuste de controlador PID. Método de Ziegler Nichols

El método citado fue planteado por los autores Ziegler y Nichols, usándose muy ampliamente por ser eminentemente prácticos, al realizar el ajuste basado en mediciones de la planta real. Es un ajuste empírico que da muy buenos resultados cuando se quiere ajustar los valores de K_d , K_i y K_d .

1.12.1 Método de oscilación de Ziegler-Nichols

Este método consta de varios pasos que se enuncian a continuación.

1. Se necesita en primer lugar abrir el lazo de control, o sea, que el sistema opere en lazo abierto.
2. Desconectar o disminuir las ganancias K_i y K_d , dejando la acción proporcional disponible y situada en el mínimo.
2. Aumentar el valor de K_p hasta que la variable controlada oscile.
3. Registrar la ganancia crítica $K_p = K_c$ y el período de oscilación P_c de la variable controlada.
4. Ajustar las ganancias del controlador PID de acuerdo a lo siguiente:

En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los parámetros de ajuste prácticos usados en el método de Ziegler Nichols.

	K_p	T_r	T_d
P	$0.50 K_c$		
PI	$0.45 K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60 K_c$	$\frac{P_c}{2}$	$\frac{P_c}{8}$

Tabla 1.2 Parámetros de controladores PID con el método de oscilación de Ziegler – Nichols.

Fuente: (Ogata, 1998)

1.12.2 Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Hay ocasiones en que la planta no puede oscilar por diferentes motivos como:

- a) Motivos de seguridad (peligro de explosión o riesgos de irreversibilidad de un proceso que puede escapar de control)
- b) Garantizar la calidad del producto final. La producción se afectaría si no se controla la variable.
- c) El proceso a medir es lento y demorado.

Se realiza un experimento a lazo abierto con el siguiente procedimiento:

1. Abrir el lazo de control conservando la variable de salida en su valor deseado controlando la variable de entrada $u(t)$. Para $t=0$ la variable es estable.
2. Aplicar un cambio escalón en la variable de entrada con valor entre 10 y 20% del valor nominal.
3. Registrar la respuesta de la variable de salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación.
4. Calcular los parámetros del modelo de las fórmulas:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}; \tau_0 = t_1 - t_0; \gamma_0 = t_2 - t_1$$

En la figura 1.15 se muestra una curva de ajuste para controlador PID con el método de la curva de reacción.

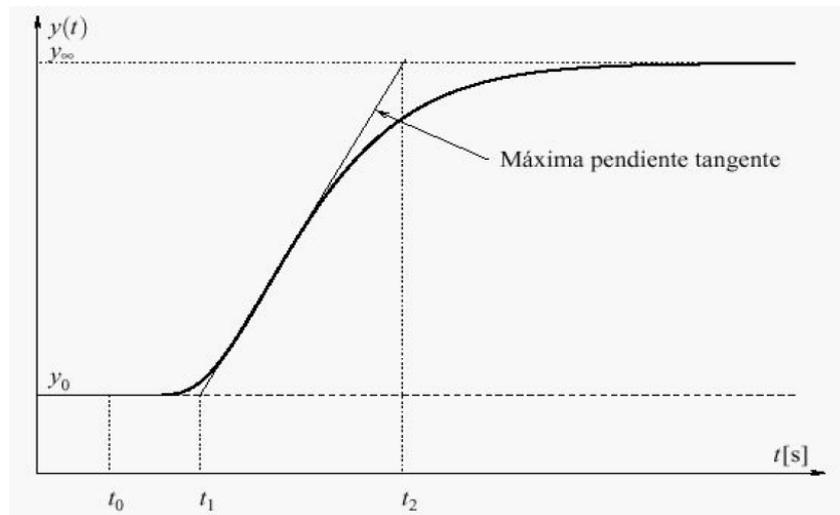


Figura 1.15 Curva de respuesta normalizada para el ajuste de los parámetros de un controlador PID.
Fuente: (MARTÍNEZ, 2011)

Capítulo 2

Marco metodológico

2.1 Tipo de investigación

La investigación realizada según el estado del conocimiento sobre el tema se considera como investigación exploratoria y descriptiva.

Los autores consideraron comenzar la investigación exploratoria porque el tema es poco conocido en el país y a los estudiantes de la Universidad Católica le es totalmente desconocido. En el mundo, las investigaciones se realizan por parte de empresas y universidades ubicadas principalmente en países desarrollados. Esta tecnología no ha dejado de ser novedosa y escasa, pues se necesitan recursos para las investigaciones. Al abordar este tema se decidió buscar más datos para investigar más profundamente.

También la investigación es de tipo descriptiva, pues con ella se busca especificar las propiedades características importantes del tema sometido a análisis.

2.2 Universo y muestra

El universo y la muestra estuvo constituido por un total de 25 egresados de la carrera de “Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo”, siendo 6 graduados de 2012 y 19 del 2013. Se seleccionaron 8 a criterio de juicio de los autores, que tomaron como criterio de inclusión ser egresado de la carrera.

2.3 Métodos

Se utilizan métodos teóricos empíricos, los cuales permiten el análisis cualitativo en la investigación.

Los métodos teóricos permitieron a los autores revelar las relaciones esenciales del objeto de investigación y el campo.

El objeto de investigación es el simulador de electrolizador y el campo de acción se consideró las prácticas de control automático de procesos en laboratorio de la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo.

2.3.1 Métodos teóricos

Dentro de los métodos teóricos aplicados se encuentran:

Método de inducción y deducción. A partir de las referencias de diferentes autores que fueron analizadas, se infirieron las regularidades o elementos más esenciales para posteriormente tener un criterio fundamentado para deducir que variables son más significativas en el diseño de un simulador de procesos de un electrolizador.

Método de transito de lo abstracto a lo concreto: Se estudió la teoría en trabajos con gran rigor matemático, sintetizando en un equipo simulador algunos elementos de este modelo. De esta forma puede verse y tocarse el proceso simulado a pequeña escala, sobre el que se pueden ejercer algunas acciones y estímulos para estudiar el comportamiento de modelo desarrollado.

Análisis y síntesis. Les permite a los autores, a partir de diferentes criterios de otras investigaciones, la búsqueda de las interacciones entre las variables del electrolizador y las leyes físicas, químicas y termodinámicas que determinan su funcionamiento. La síntesis se utilizó conociendo las propiedades y leyes principales del electrolizador para sintetizar un modelo que representa una versión simplificada de la realidad.

Método sistémico. Es considerado porque se contribuye a lograr una concepción unificada del simulador de electrolizador para prácticas de control automático de procesos.

Método de modelación: permite modelar elementos del objeto mediante la determinación de sus componentes y su interrelación, que determinan por un lado la estructura del objeto y su dinámica.

2.3.2 Métodos empíricos

Se utiliza la técnica de la encuesta, considerando la operacionalización de variables, lo que permite a los autores efectuar análisis e interpretación de la información y conocer las necesidades para el desarrollo del aprendizaje del control automático de equipos para el aprovechamiento de energías renovables, especialmente el electrolizador.

2.4 Variables

Variable independiente: Se considera la “No inclusión de contenidos para la enseñanza de Automatización de tecnologías de aprovechamiento de energías renovables”

Variable dependiente: “Propuesta de simulador electrónico para prácticas de control automático de procesos en electrolizadores alcalinos”

2.4.1 Operacionalización de variables:

Inclusión: Es un concepto teórico de la pedagogía, surgido a fines de los años 90, con el supuesto de que los contenidos estudiados en los centros de educación deben responder a las necesidades de todos los estudiantes en lugar de estos adaptarse a los contenidos. La enseñanza debe ser heterogénea.

Contenidos de la carrera: Temas que se incluyen en la malla curricular para la formación del profesional según su perfil. Según las competencias que se quieran lograr es que se diseñan los contenidos para integrarlos entre las distintas asignaturas.

Enseñanza: es el acto de transmitir conocimientos, valores e ideas. Son muy diversos los métodos y las técnicas que se utilizan. Actualmente lo más aceptado es orientar a los alumnos para adquirir los conocimientos, siendo importante adaptarse a las circunstancias y grupos con los que se trabaja, porque no todos son iguales, ni tienen los mismos intereses o necesidades.

Automatización: Consiste en la creación de procesos industriales que se regulen por sí mismos, con mínima o sin ninguna intervención humana. Se basa en la utilización de medidores y captadores que miden variables de interés, transmitiendo a un controlador estos datos que son analizados, procesados, permitiendo accionar una variable que actúa sobre el proceso controlado, con la magnitud correcta para corregir cualquier desviación del valor deseado o consigna.

Tecnologías: Son los conocimientos técnicos, que permiten diseñar y crear bienes y servicios para mejorar aspectos de la vida, para facilitar la adaptación al medio ambiente y satisfacer necesidades de la humanidad. Se llama simplemente tecnología, aunque hay muchas tecnologías variadas.

Aprovechamiento de energías renovables: Es la filosofía de aprovechar las energías que no cuestan nada porque están disponibles en la naturaleza y son inagotables por tener mucha energía o regenerarse por sí mismas. Existe la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, geotérmica y undimotriz.

Simulador electrónico: Se llama así a un dispositivo que reproduce un proceso o grupo de procesos reales con medios electrónicos. En la década de los 50 del siglo XX, se utilizaron computadoras analógicas, que se basaban en la modelación electrónica con amplificadores operacionales formando integradores, diferenciadores, amplificadores y otras funciones. También es posible diseñar simuladores con técnicas digitales.

Prácticas de control automático de procesos: Prácticas que se realizan con el objetivo de adiestrar estudiantes, trabajando en ambientes controlados, con poco riesgo y a pequeña escala, reproduciendo procesos reales cuyos parámetros de interés son medidos y controlados mediante técnicas de control. Permite familiarizarse con el proceso real y la forma de controlarlo.

Electrolizadores alcalinos: Dispositivo o equipo que convierte agua en hidrógeno + oxígeno al pasar una corriente eléctrica por el electrólito. Se utiliza una base o un ácido para proveer los iones que son los que portan la corriente dentro del electrolizador, ya que el agua pura no conduce la electricidad.

2.5 Análisis e interpretación del instrumento aplicado en el diagnóstico de necesidades

El análisis e interpretación de los resultados se realiza a partir de la encuesta aplicada a la muestra de la investigación. Los resultados se procesan utilizando métodos cualitativos y cuantitativos.

El instrumento permite conocer los elementos esenciales para dirigir la investigación y proponer diseño y construcción de simulador de electrolizador para prácticas de control automático de procesos.

Se diseñó y aplicó encuesta a estudiantes para conocer el estado de su conocimiento y motivación en el tema del control automático en equipos para aprovechar energías renovables. A continuación se describen las respuestas dadas a las preguntas.

Entre las necesidades identificadas se plantea que la búsqueda y asimilación de tecnologías alternativas para sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables es considerada “muy importante” por el 62.5% de los 8 encuestados, mientras que el resto del 37.5% del total considera importante este tema. Por lo que los autores infieren que el que el tema es considerado importante en mayor o menor grado.

A la pregunta de si recibió en su formación académica contenidos para automatización de procesos en sistemas de aprovechamiento de energías renovables, de los 8 estudiantes encuestados, 8 contestaron no haber recibido contenidos de este tipo para una 100% del total.

Sobre la opinión que tenían los graduados en relación a la necesidad de tener conocimientos sobre las tecnologías de utilización de energías renovables en su futuro desempeño profesional, de los 8 estudiantes encuestados, 7 (87%) respondieron que era necesario y 1 que no veía necesario su conocimiento.

Al preguntar sobre si tenían conocimiento de las ventajas del hidrógeno como vehículo para almacenar energía, un estudiante fundamentó correctamente y los demás plantearon total desconocimiento. Solo el 12% de encuestados que conocen las ventajas del hidrógeno.

A la pregunta formulada sobre el conocimiento de que es un electrolizador los 8 plantearon desconocer sobre el tema.

Respecto al conocimiento del principio de funcionamiento de un electrolizador ninguno de los 8 sabe que variables controlar.

Sobre la necesidad de diseñar un medio didáctico para el aprendizaje inicial del control automático de electrolizadores todos coincidieron en que era necesario para un 100%.

Capítulo 3

Estudio de modelos de electrolizadores

En la bibliografía sobre modelos matemáticos de electrolizadores se encontraron coincidencias entre varios de ellos. Los autores (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011), (Griesshaber & Sick, 1991), (Hug, Bussmann, & Brinner, 1993)

El objetivo de esta búsqueda es conocer las relaciones entre las distintas variables y determinar las variables que se controlarán en un electrolizador.

3.1 Modelo termodinámico de un electrolizador

Se explica a continuación una breve descripción de la termodinámica de las reacciones electroquímicas del hidrógeno-oxígeno a bajas temperaturas usada en el modelo del electrolizador, en la cual se asume una temperatura máxima de 100°C.

Los siguientes supuestos se pueden hacer sobre la reacción de disociación del agua:

- a) El hidrógeno y el oxígeno son gases ideales.
- b) El agua es un fluido incompresible.
- c) Las fases de gas y líquidos están separadas.

Basado en estas suposiciones, el cambio en la entalpía δh , la entropía δs y la energía de Gibbs δg de la reacción de electrólisis del agua se puede calcular con referencia al hidrógeno puro (H^2), oxígeno (O^2), y agua (H^2O) a temperatura y presión estándar (25°C y 1 bar).

El cambio total de entalpía para descomponer el agua es la diferencia de entalpía entre los productos (H^2 y O^2) y los reactivos (H^2O). Lo mismo se aplica para el cambio total en entropía δS .

La diferencia de entalpia para producir la electrólisis es, por tanto:

$$\delta h = \delta g + T\delta s$$

De la ecuación anterior se deduce el cambio en la energía libre de Gibbs:

$$\delta g = \delta h - T\delta s$$

Como se aprecia, la temperatura influye y determina en ocasiones la ocurrencia de reacción espontánea. Se pueden dar 3 condiciones:

- En condiciones de equilibrio, $\delta g=0$.
- Si $\delta g < 0$, la reacción se produce espontáneamente.
- Si $\delta g > 0$, la reacción no se produce.

La variación de energía libre de Gibbs estándar δg^o para la disociación del agua por electrólisis es $\delta g^o=237.178 \text{ kJmol}^{-1}$, significando esto que la reacción no es espontánea en un electrolizador.

3.1.1 Voltaje Reversible y Termoneutro

Para un proceso electroquímico operando a presión y temperatura constante, el máximo trabajo útil (o sea, trabajo reversible) es igual a la variación de la energía de Gibbs δg . El potencial reversible (V_{rev}) representa la cantidad mínima de energía que puede ser suministrado en forma de electricidad para llevar a cabo la electrólisis del agua y se expresa:

$$V_{rev} = \frac{\delta g}{zF}$$

Donde z es el número de electrones transferidos por molécula de hidrógeno. Que es igual a 2 y F es la constante de Faraday, igual a 96.485 Cmol^{-1} . (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011)

El voltaje termodinámico para la disociación del Agua en Hidrógeno + Oxígeno (V_{rev}), se reduce proporcionalmente al aumentar la temperatura de operación. La siguiente relación, para $V_{rev, T}$ (en función de la temperatura), según refiere el autor (LeRoy, 1983) , siendo T expresada en grados Kelvin):

$$V_{rev,T} = 1.5184 - 1.5421 \cdot 10^{-3} \cdot T + 9,523 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln T + 9.84 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

El resto de la energía requerida para alcanzar δH , o potencial termo neutro (V_{tn}), se suministra en forma de calor ($T\delta s$) a una temperatura suficientemente alta.

La entalpía estándar para disociar el agua por electrólisis es $\delta h^\circ = 286 \text{ kJ mol}^{-1}$. El potencial termoneutro se expresa como:

$$V_{tn} = \frac{\delta h}{zF}$$

En condiciones normales:

$$V_{rev} = \frac{237178}{2 * 96485} = 1.229 \text{ V}$$

$$V_{tn} = \frac{286000}{2 * 96485} = 1.482 \text{ V}$$

Estos valores de potencial varían con la temperatura y la presión. En el rango de temperatura aplicable, V_{rev} disminuye ligeramente con el aumento de la temperatura (V_{rev} a 80°C , 1 bar = 1.184 V), mientras que V_{tn} permanece casi constante (V_{tn} a 80°C , 1 bar = 1.473V).

Al aumentar la presión, el potencial V_{rev} aumenta ligeramente, (V_{rev} a temperatura de 25°C y presión de 30 bar alcanza un valor de 1.295V), mientras que V_{tn} permanece constante. Los valores de V_{rev} utilizados se obtienen a partir de la fórmula (3).

3.2 Modelo electroquímico

3.2.1 Curva de voltaje – corriente del electrolizador

La curva utilizada para modelar el electrolizador es una curva I-V, que representa el voltaje de la celda vs la corriente. La forma básica de la curva es sugerida de la siguiente fórmula:

$$V = V_{rev} + \frac{r}{A}I + s \log\left(\frac{t}{A}I + 1\right)$$

Dónde:

- V es el voltaje aplicado en los bornes.
- V_{rev} es el voltaje reversible (dependiente de Voltaje y Temperatura)
- r es la resistencia óhmica del electrólito en Ohms)
- s, t son coeficientes empíricos representativos del sobre voltaje en los electrodos.
- A es el área de los electrodos en m^2
- I es la corriente a través de la celda electrolítica.

La fórmula anterior no contiene dependencia de los sobre voltajes. Para modelar adecuadamente la dependencia de la Temperatura con los sobre voltajes, los autores anteriores propusieron la formula empírica siguiente.

$$V = V_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + s_1 \log\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} I + 1\right)$$

Donde los valores r_1, r_2 son coeficientes de resistencia óhmicos y s_1, t_1, t_2, t_3 son coeficientes de sobre voltaje.

La obtención de estos parámetros se hace experimentalmente tomando mediciones sistemáticas de acuerdo a los pasos siguientes, recomendados por (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011)

- (1) Recopilar datos experimentales u operativos para la corriente I, tensión V y temperatura T.
- (2) Organización de los valores medidos para I y V en conjuntos de datos con respecto a valores constantes para T.
- (3) Realizar ajustes de curvas individuales de los tres coeficientes r, s_1 , y t en la ecuación.
- (4) Repita el paso (3) para algunas otras temperaturas entre $T = 20^\circ\text{C}$ y 80°C).
- (5) Realizar ajustes de curvas intermedias en los coeficientes dependientes de la temperatura r y t
- (6) Verificar que los coeficientes dependientes de la temperatura se comportan de acuerdo con las expresiones:

$$r(T) = r_1 + r_2 T$$

$$s_1 = t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}$$

(7) Realizar un ajuste de curvas general para todo el conjunto de datos, utilizando los valores r_i , S_i y T_i , encontrado de los pasos (1) a (6) como valores iniciales para el análisis de regresión.

La tabla 3.1 contiene valores de los parámetros del sobre voltaje obtenidos para un electrolizador concreto.

Parámetro	Valor	Unidad de medida
r_1	$8.05 \cdot 10^{-5}$	Ωm^2
r_2	$-2.5 \cdot 10^{-7}$	$\Omega m^2 \text{ } ^\circ C^{-1}$
s_1	0.185 V	V
t_1	-1.002	$A^{-1} \cdot m^2$
t_2	8.424	$A^{-1} \cdot m^2 \cdot C$
t_3	247.3	$A^{-1} \cdot m^2 \cdot C^2$

Tabla 3.1 Parámetros obtenidos empíricamente para la razón V-I del electrolizador.
Fuente: (Khater, Abdelraouf, Mohamed, 2011)

La figura 3.1 representa el cálculo de la curva V-I, teniendo en cuenta sobre voltajes y temperatura.

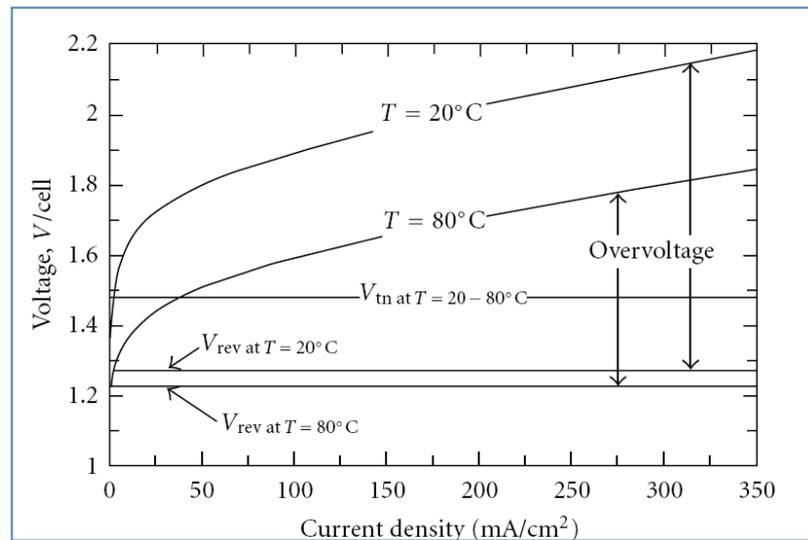


Figura 3.1. Curva de Densidad de Corriente vs Voltaje de celda de un electrolizador comercial.
Fuente: (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011)

Puede apreciarse que a mayor temperatura, es menor el voltaje a aplicar para producir la electrólisis. Esto significa que con el mismo voltaje aplicado, a mayores temperaturas, la corriente será mayor y por tanto, el volumen de hidrógeno producido será mayor. Se aprecia así la conveniencia de trabajar a altas temperaturas.

En la figura 3.2 se puede apreciar tres zonas delimitadas.

- En la zona 1 se aplica voltaje superior al Voltaje Termoneutro y la electrólisis se produce, generándose además un exceso de temperatura, resultante del exceso de energía aplicado. La diferencia entre el voltaje termo neutro y el voltaje aplicado se convierte en calor, que debe ser extraído por el sistema de refrigeración del electrolizador.
- En la zona 2, se produce la electrólisis si se suministra en forma de calor la energía equivalente a la potencia eléctrica $P_{elec} = (V - V_{tn}) \cdot I$ que falta.

- En la zona 3 no se produce electrólisis y la corriente es nula.

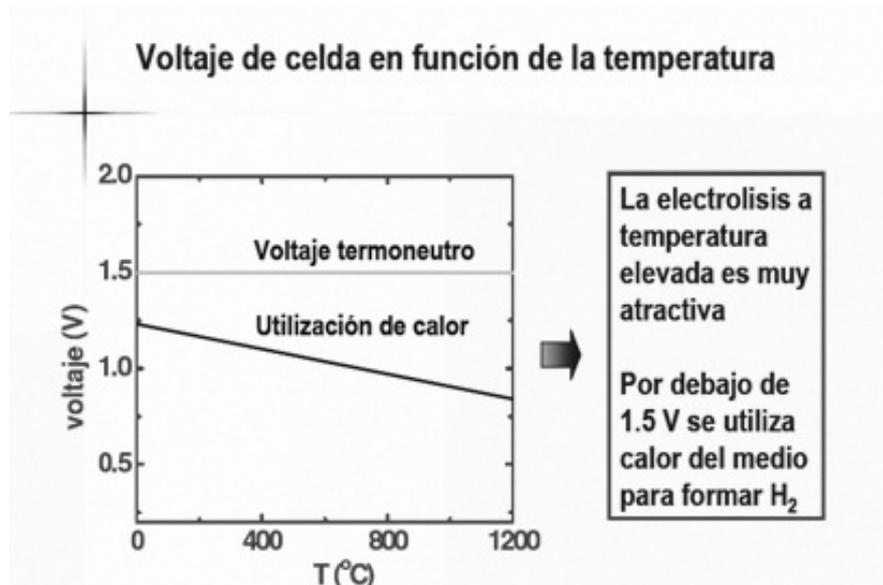


Figura 3.2 Relación entre el voltaje termo neutro y reversible con la temperatura.
Fuente: (Fierro, 2012)

3.3 Flujo o caudal de hidrógeno

Para cada mol de agua consumida, se genera un mol de hidrogeno y 2 moles de electrones que representan la corriente que provoca la electrolisis.

El cálculo de la razón de producción de hidrógeno, llamada $\frac{dN_{H_2}}{dt}$ se calcula con la siguiente formula:

$$nH_2 = \eta_f \frac{NI}{ZF}$$

Dónde:

η_F es la eficiencia de Faraday (Adimensional)

N es el número de celdas en serie del electrolizador.

I es la densidad de corriente a través del electrolito en $\frac{\text{Amperes}}{\text{cm}^2}$ o $\frac{\text{Coulombs}}{\text{seg}\cdot\text{cm}^2}$

Z es el número de electrones transferidos. $\frac{2 \text{ moles de } e^-}{1 \text{ mol de } H_2}$

F es la constante de Faraday. $F=96485 \frac{\text{Coulomb}}{\text{mol de } e^-}$

El rendimiento de Faraday utiliza la expresión definida por el autor (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011) que plantea una formula empírica con dos factores f_1 y f_2 , siendo η_F la siguiente ecuación:

$$\eta_F = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} f_2$$

Los parámetros f son dependientes de la temperatura y se calculan utilizando técnicas de regresión o ajuste de curvas, al disponer de datos experimentales extensos.

La gráfica de la figura 3.3 fue posible realizarla utilizando los valores de la Tabla calculada con datos experimentales en el trabajo del autor (Pino Lucena, 2010) expresa la eficiencia de Faraday en función de la corriente para varias temperaturas. Se puede apreciar que para densidades de más de 25 A/cm² la eficiencia va a estar por encima del 97%

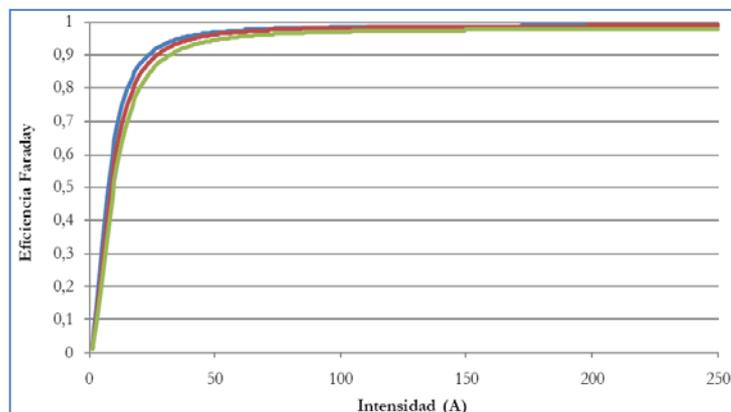


Figura 3.3 Curva que representa la Eficiencia de Faraday vs densidad de corriente Intensidad en el electrolizador.

Fuente: Confeccionado por Autores con Microsoft Excel.

La ecuación para la razón de producción de hidrógeno es la siguiente:

$$mH_2 = \eta_f \frac{NI}{zF}$$

En ella, los elementos N , z , F son valores constantes para un electrolizador real. Por su parte, η_f es una ecuación exponencial. Esta ecuación puede simplificarse para densidades de corriente $I > 25\text{mA/cm}^2$. De acuerdo a la curva para la eficiencia de Faraday, es claro que esta tiende a la asíntota de

la eficiencia ideal $\eta_f = 1$. En el peor caso, la eficiencia vale 0.97. Por tanto, para el presente trabajo se asume que η_f es una constante con valor 0.97.

Asumiendo constante la variable η_f para valores de $I > 25 \text{ mA/cm}^2$, la razón de producción de hidrógeno en función de la corriente suministrada para la electrólisis puede considerarse lineal.

$$n_{\text{H}_2} = 0.97 \frac{6 \cdot I}{2 \cdot 96485} \text{ en } \frac{\text{moles H}_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg}}$$

Realizando las multiplicaciones:

$$n_{\text{H}_2} = 3.016012 \cdot 10^{-5} \cdot I$$

Es obvio que la producción de hidrogeno es directamente proporcional a la corriente, porque cada molécula formada de hidrogeno, se generan dos electrones.

El caudal de hidrógeno Q en Nm^3/h es:

$$Q = 3600 \cdot 0.022414 \cdot n_{\text{H}_2}$$

$$Q = 2.433628 \cdot 10^{-3} \cdot I$$

3.4 Estrategias de control de un sistema de aprovechamiento de energías renovables

Un sistema de aprovechamiento de energías renovables, se muestra en la figura 3.4.

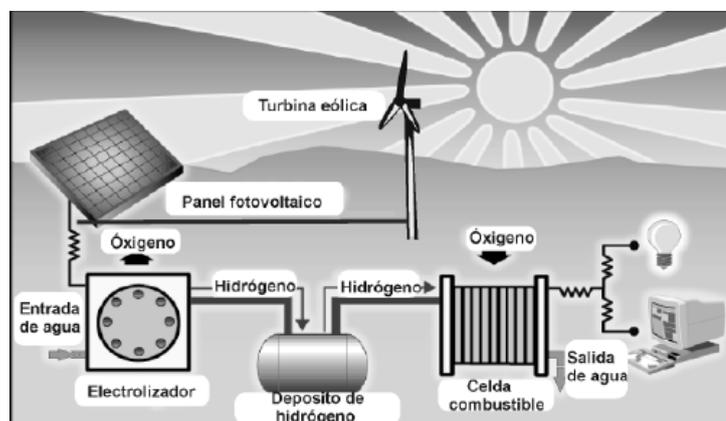


Figura 3.4 Esquema de un sistema con aprovechamiento de energías renovables. Fuente. (Engel & Basualto, 2010)

3.4.1 Estrategia de control para el sistema

El sistema de la figura 3.4, tomado de una fuente informativa, está representado con menos elementos que los que realmente requiere. Puede decirse que esta es una estación 100% de energía renovable. Sin embargo, se debe recordar que las energías renovables no siempre están disponibles cuando se las necesita. Puede presentarse el caso de días con calma, en los que no haya viento. En ese caso, los aerogeneradores no funcionarían y la planta no generaría energía. Otro ejemplo es el caso de que el día sea nublado o sea de noche. En ese caso los paneles solares no generarán corriente suficiente.

Es por eso que los sistemas que aprovechan energías renovables se diseñan como sistemas híbridos, en los que se introducen elementos convencionales como generadores para cuando fallen las energías renovables. Un elemento imprescindible que no debe faltar son los bancos de baterías, pues los mismos permiten absorber el exceso de energía y suplirla cuando es necesario.

Los sistemas se han tratado de programar con criterios económicos, en función de los precios de los combustibles y tarifas de la energía.

3.4.1.1 Régimen de baja demanda

Se estima cual sería la mejor utilización de una estación que utilice energía renovable en el caso que la demanda sea menor que la disponibilidad de energías renovables.

En las horas de baja demanda eléctrica, quizás por la madrugada, la regla de control básica será utilizar la energía de las fuentes renovables para alimentar las cargas que en este caso serán los consumidores de energía, el electrolizador que produce hidrógeno y se almacena en tanques de hidruros. También las baterías reciben carga en ese momento y a la vez tienen la función de regular la corriente y el voltaje, corrigiendo excesos y defectos de energía eléctrica instantáneos que podrían presentarse.

3.4.1.2 Régimen de alta demanda

Si en las horas pico o de alta demanda, las fuentes renovables no son capaces de suministrar toda la demanda de energía a los consumidores, hay que recurrir a la pila de combustible, en primer lugar para que transforme el hidrógeno acumulado en energía mediante un proceso reversible. La energía de las baterías también puede utilizarse para suplir el defecto de energía. Si no es suficiente con esto, deben utilizarse plantas diesel o energía de la red comercial. En estas horas pico, cuando la electricidad se paga a mayor precio, se justifica gastar el hidrógeno almacenado para transformarlo en energía eléctrica, utilizando la pila de combustible. Esa energía “ecológica” disminuye el consumo de la red externa cuando más cara es obtener la electricidad.

3.4.2 Definición de variables de control

Se definen las variables de control para la estación de energía renovable.

Los dispositivos como electrolizador, pila de combustible y baterías tienen un rango de operación entre un valor mínimo y un valor nominal de explotación, por debajo del cual no se justifica práctica y económicamente tenerlos en operación. Estos valores son utilizados como consignas o límites extremos en los que no se permite la operación del dispositivo por consideraciones de rendimiento, ya que no hay beneficio en valores del parámetro por debajo de ese límite.

Las variables de control son:

- **P_{nom_elect}** : Es la potencia nominal para la que el fabricante diseña el electrolizador.
- **P_{min_cel}** : Es el valor mínimo al que se justifica el uso de la celda combustible. El valor de potencia entregada por la celda estará entre P_{nom_cel} y P_{min_cel} . Por debajo de ese valor, el consumo específico de la celda aumenta y la eficiencia baja a límites que hacen recomendable no utilizar la celda combustible.

- **SOC_{min}**: El parámetro aplicable a las baterías “Estado de carga” o State of Charge mínimo, es aquel valor que el fabricante recomienda como límite por debajo del cual no deben trabajar las baterías. Esta recomendación del estado de carga del fabricante está basada en el efecto que causa el grado de descarga de las baterías en el número de ciclos de carga descarga que tendrá la pila durante su vida útil.

3.5 Control automático del electrolizador

Una vez realizado el estudio de la dinámica de un electrolizador, pueden plantearse algunas ideas que contribuirán al control de proceso de producción de hidrógeno.

Las variables más importantes se explicarán a continuación.

nH₂O:

Es la razón de flujo de agua desmineralizada. Esta es una variable que se controlará. Debe tenerse presente que por cada mol de Hidrógeno producido hay que introducir un mol de agua al electrolizador. Por tanto, siempre debe haber suficiente agua desmineralizada para que no falte. Los tanques de agua desmineralizada son de un volumen comparable o mayor al volumen del electrolizador.

P_{solar} y P_{aero}

Energía procedente del aerogenerador o del panel solar... Esta potencia es recibida por el convertidor DC/DC, el cual tiene capacidad PWM, garantizando a su salida voltajes y corrientes controlados, sin que el convertidor AC/DC tenga pérdidas significativas por disipación de energía. El régimen PWM permite que los transistores del convertidor no trabajen en zona activa.

I_{conv}

La corriente del convertidor puede variar, pero siempre debe ser inferior a I_{max} definida por el fabricante (corriente máxima que soportan los transistores de salida de la fuente sin romperse. Por tanto, este es un parámetro que el convertidor debe limitar. También debe estar de acuerdo a la corriente de diseño del electrolizador.

Nivel de electrolito en el electrolizador:

Es un parámetro muy importante dentro del control del electrolizador. El nivel no puede descender de un nivel mínimo L03. Si se produce ese evento se debe desconectar la energía y señalar la falla.

El nivel debe controlarse con un regulador PID para que se mantenga en L2 que es un 45%-50% del nivel máximo.

Tampoco se permite subida de nivel por encima de L1 por motivos de seguridad, pues a este nivel comienzan a mezclarse los dos gases en proporciones que representan peligros de explosión. Esta mezcla puede producirse en los conductos de comunicación de los separadores.

El nivel se ve afectado por la conversión de hidrógeno. El agua con electrolito presente dentro del electrolizador tiene un nivel que se controla dejando entrar más o menos cantidad de agua tratada. El electrolizador es alimentado por un convertidor DC controlado que regula la potencia suministrada.

En la configuración del sistema de la figura 3.5, el modulo funcional se alimenta de un bus de CC y CA alternativamente.

Un lazo cerrado realiza la función de control automático de potencia actuando con modulación de ancho del pulso (PWM). La potencia que el electrolizador toma de la red es controlada mediante el control de la corriente transferida al electrolizador.

Se desea que la potencia de alimentación del electrolizador PH provenga de las fuentes renovables (paneles solares y turbina eólica). Primero se compara la potencia disponible de los generadores con la consigna de Potencia Mínima, de forma que no se permita la operación por debajo de esa

potencia. Si esto sucede porque los generadores de energía renovable no llegan a suplir dicha potencia, el electrolizador se apaga, quitándole el suministro de potencia. En el caso que la energía disponible sea suficiente para garantizar el mínimo de operación se controla la corriente con un lazo de control.

El valor deseado de corriente o consigna de corriente se obtiene a partir del valor de potencia deseado a transferir. Los valores mínimos y máximos de corriente están previstos en el control al convertidor DC para evitar que el sistema arranque en condiciones peligrosas o no económicas.

La muestra de corriente y potencia es acondicionada con circuitos pasabajos para eliminar interferencias.

La figura 3.5 muestra un sistema típico de control para producir hidrógeno en un electrolizador.

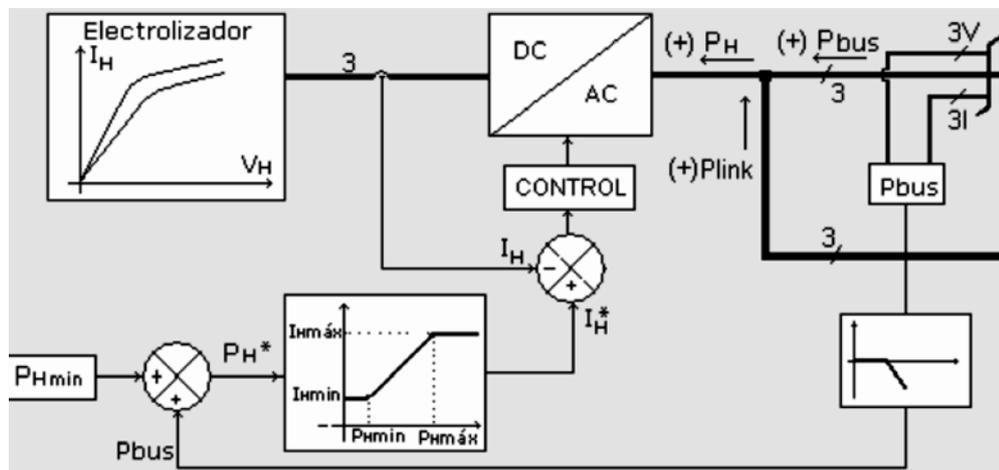


Figura 3.5 Control de la potencia de entrada al electrolizador.
Fuente: (Camocardi, Toccaceli, & Battaiotto, 2011)

Capítulo 4

Diseño de simulador del control de nivel en un electrolizador

El electrolizador es un equipo en el que se produce una reacción química al pasar una corriente por el electrolito. La dinámica de este proceso está estudiada en muchos trabajos. Sin embargo, para un estudiante novel, su funcionamiento es un enigma, debido a la poca utilización que se le da en el mundo y en Ecuador.

No obstante, debido a lo importante que resulta pensar cómo ayudar a la naturaleza a recuperar su equilibrio y a reducir la contaminación ambiental, es que se comienza este estudio, con el objetivo de poner en manos de los estudiantes, un medio didáctico que los acerque a este fascinante aspecto de la tecnología y del conocimiento.

Se dispone de un simulador que modela algunas características de un electrolizador y que será descrito en este capítulo.

4.1 Concepto de simulador y su aplicación en este trabajo

Un simulador representa aspectos esenciales de un proceso químico físico, etc. El modelo desecha características no relevantes del objeto real, enfocándose en las principales o en las que se desean estudiar.

En este trabajo se modelan algunos parámetros de un electrolizador para estudiar su comportamiento y permitir el estudio en laboratorio. Puede utilizarse el simulador como herramienta didáctica para el aprendizaje del control de procesos. El aprendizaje de esta tecnología que, aunque es conocida desde hace décadas, ha cobrado importancia por la necesidad de aprovechar las energías renovables y buscar sustitutos a los combustibles fósiles.

4.2 Importancia de los simuladores en la enseñanza – aprendizaje de las tecnologías de control de procesos

Para el aprendizaje de control de procesos no es conveniente practicar con procesos reales en industrias porque existen ciclos de producción en los que no puede haber error alguno. Las variaciones en los parámetros de producción conllevan frecuentemente la reducción de la calidad del producto o conducir a situaciones peligrosas o desastres como explosiones, incendios, etc.

Con el uso de simuladores, el estudiante se familiariza con los procesos industriales a una escala menor con menos riesgos y con bajos costos. Puede equivocarse sin que esto conlleve la destrucción de alguna planta industrial. El aprendizaje de los errores cometidos es muy útil al estudiante para lograr las competencias requeridas para el perfil profesional.

Para controlar procesos industriales, el ingeniero en Control Automático debe conocer lo suficiente para tener una idea de que variables son esenciales para el funcionamiento correcto del proceso, las restricciones y simplificaciones que se pueden realizar y el efecto de la interacción entre las variables.

El uso de simuladores permite experimentar en un ambiente controlado, donde errores que cometan los estudiantes produzcan solo “indicaciones de error”, que incentivan el aprendizaje, al brindarse la oportunidad a estos de rectificar el proceder que provocó el error.

4.3 Diseño del equipo simulador

4.3.1 Almacenamiento de líquido dentro del electrolizador

Se simula con propósitos didácticos el almacenamiento de líquido dentro del electrolizador. La idea para realizarlo es utilizar contadores digitales para simular el llenado o vaciado del interior del electrolizador. La variable de control que se debe controlar es el nivel de agua con electrólito. El nivel se indica en unidades absolutas o por ciento de llenado del electrolizador. Con

valores posibles entre 0% y 99%. La indicación de nivel se ofrece en formato digital a través de dos *displays* de 7 segmentos y también en un formato analógico normalizado entre 0%-10% y 90%-100%, utilizando LEDS indicadores en intervalos de 10%.

4.3.2 Entradas y salidas del modelo electrónico para el nivel del líquido

La figura 4.1 está simplificada para ofrecer al lector una idea de los parámetros que influyen en el nivel del electrolizador. Debe tenerse en cuenta el propósito didáctico de este trabajo. Los elementos complejos como formulas se estudiaron por los autores en su momento para entender la esencia del funcionamiento del electrolizador, pero esta complejidad no es adecuada para estudiantes sin preparación previa en esta rama del conocimiento.

Se asume un modelo simplificado, orientado a la enseñanza que no está cargado de la complejidad del modelo real de un electrolizador. Sin embargo, esta complejidad teórica fue analizada para comprender el funcionamiento de esos equipos. El lector interesado puede consultar los trabajos descritos en capítulos anteriores por los autores (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011), (Griesshaber & Sick, 1991), (Hug, Bussmann, & Brinner, 1993). Se tuvo también referencia de electrolizadores comerciales de varias firmas, analizados por varios autores.

El nivel de líquido dentro del electrolizador se ve afectado de diferentes formas: Aumenta por la entrada de agua tratada y disminuye en diferentes grados por el suministro de energía eléctrica, que implica necesariamente producción de hidrógeno.

Agua tratada: Se suministra el líquido para compensar la pérdida dentro del electrolizador como consecuencia de la transformación y salida en forma de gas hidrógeno + oxígeno. El caudal de agua se emplea como variable correctora del nivel de líquido. La entrada de agua tratada se controla en los electrolizadores reales con una válvula de solenoide, del tipo ON/OFF que

resulta adecuada para este propósito. Al disminuir el líquido se abre la válvula permitiendo entrar el agua para aumentar el nivel. Al cerrarse la válvula el líquido puede quedarse en el mismo nivel o disminuir. El control puede ser ON/OFF o PI o PID. Esta variable es esencial y muy importante porque el nivel adecuado garantiza la seguridad del proceso. Debe tenerse en cuenta que el hidrogeno es extremadamente inflamable y hay que tener cuidados extremos para evitar explosiones.

Salida de hidrógeno: El gas producido será almacenado y posteriormente reconvertido en energía por una celda de combustible. El oxígeno puede almacenarse también para su aprovechamiento o puede ser liberado a la atmósfera. La producción de un mol de hidrógeno es directamente proporcional a la corriente suministrada al electrolizador. También se necesita un mol de agua tratada por cada mol de hidrógeno.

Entrada de energía eléctrica: La corriente o intensidad DC es un torrente de electrones que entra al electrolizador y recorre el electrolito entre los dos electrodos.

La figura 4.1 expresa resumidamente las entradas y salidas de un electrolizador.

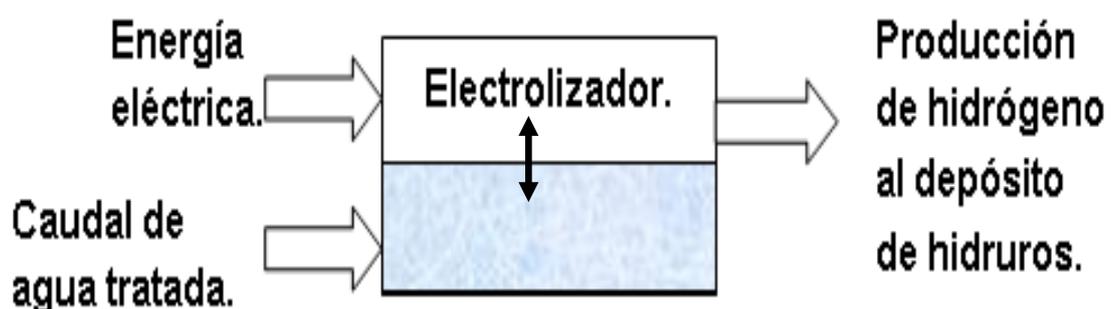


Figura 4.1 Diagrama de bloques de las entradas y salidas principales del electrolizador.

Fuente: Confección por autores.

4.3.3 Indicador de nivel en el electrolizador

La indicación de nivel de líquido se simula electrónicamente, utilizando dos contadores bidireccionales del tipo 74190 cuyo diagrama es representado en

la figura 4.2. Los dos contadores se conectan en cascada para lograr una indicación mínima de “00” y máxima de “99” que representa el porcentaje de nivel de líquido alcanzado. Las salidas BCD de cada contador son procesadas por sendos decodificadores BCD a display de 7 segmentos del tipo 7447 y estos a su vez iluminan las lámparas LED de 7 segmentos que indican el número que representa el nivel. El conteo es posible hacia arriba y hacia abajo, simulando llenado y vaciado respectivamente. La figura 4.2 representa esquemáticamente la estructura funcional del circuito contador 74190.

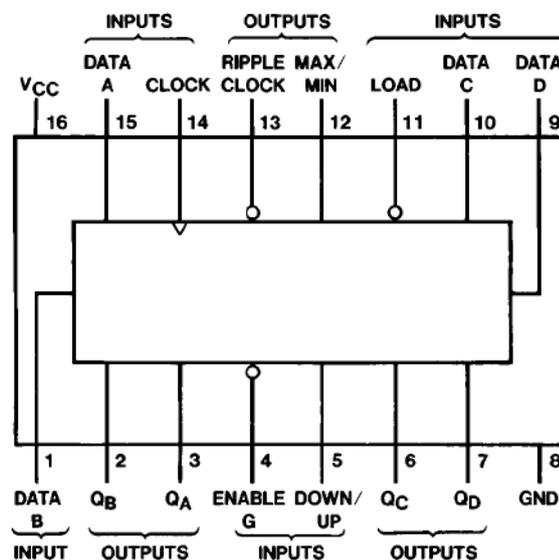


Figura 4.2 Diagrama del circuito contador 74190/74191.
Fuente: (Texas Instruments, 2000)

Referido a la figura 4.2, la entrada *Enable* al estar activa en `0`, permite que el contador realice los conteos y al estar inactiva, el conteo cesa. También la entrada *Down/Up* define la dirección del conteo. Si *Down/Up* es `0` el conteo es creciente y viceversa. Los dos contadores se van a conectar teniendo en común las entradas *Clock*, *Down/Up* y *Load*. La señal de reloj será sincrónica para los dos contadores. La salida *Ripple Clock* del contador de unidades se conecta al *Enable* del contador de unidades y con eso se consigue que funcionen en cascada, tanto en conteo creciente como decreciente. Las salidas DBCA de cada contador conforman un código BCD

de 0 a 9, que se transfiere a los decodificadores. El esquema eléctrico es presentado en el anexo 3.

4.3.4 Limites de nivel máximo y mínimo

El modelo electrónico del nivel en el electrolizador prevé que no existan niveles mayores de 99% ni menores que 0%. Esos serían los valores extremos del nivel. En la práctica no pueden alcanzarse estos niveles ni aún cercanos a ellos, porque pueden producirse explosiones. Durante el control manual del electrolizador estos valores pueden alcanzarse, aunque no se permite que el conteo cambie de 99 a 00 y viceversa, pues significaría que el tanque se vacía o llena instantáneamente, hecho que no sucede en realidad. Para impedir el cruce de 0 a 99 ello se inhibe el conteo con las señales *Enable* de cada contador mediante un circuito lógico diseñado al efecto.

Si el estudiante en práctica experimenta la situación mencionada, las alarmas previstas le permitirán darse cuenta que el nivel alcanzó un valor de alto peligro en caso de ser un proceso real. Se señala esta situación de alarma con indicación lumínica y sonora, permitiendo al estudiante darse cuenta de su “error” y realizar las correcciones pertinentes, aprendiendo de sus errores.

4.3.4.1 Lógica de bloqueo del contador. Conteo hacia arriba

Para que el simulador actúe como un proceso real de indicador de nivel en un depósito, es necesario bloquear el conteo al llegar al máximo o mínimo. El contador puede alcanzar el máximo posible de 99%. Si no se bloquea el conteo en este momento, la indicación pasará a 00%, lo cual es imposible físicamente. Para evitar esto, se monitorea el estado de las salidas BCD.

Se realizó un análisis lógico del contador al llegar al número 99, detectándose que las salidas D y A de ambos contadores son `1`, correspondientes al número 9 decimal o 1001 en binario. Entonces, las salidas A, D de ambos contadores se llevan a una compuerta AND de 4

entradas del tipo 74LS21, cuya salida será `1´ solamente cuando el contador alcance el número 99.

4.3.4.2 Lógica de bloqueo del contador. Conteo hacia abajo

Si el contador realiza una cuenta decreciente, alcanzando la indicación 00, pasaría a `99´, si no se bloquea el conteo. El análisis lógico del contador al llegar a la indicación 00 indica que todas las salidas BCD estarán en 0. La condición de “conteo=00” se detecta con una compuerta NAND de 8 entradas 74LS30, que tendrá en su salida un valor `1´ cuando todas las salidas de ambos contadores sean `00´.

4.3.4.3 Bloqueo de la señal de reloj

Al detectarse una de las condiciones descritas en los epígrafes 4.3.4.1 y 4.3.4.2, se desactiva la señal de habilitación de los contadores para inhibir el conteo. Para eso se elabora la señal STOP, que se explica a continuación. La señal de parada STOP se conforma para que impida que el conteo cambie bruscamente de 0 a 99 o viceversa. Esta señal booleana se va a conformar de la siguiente forma:

$$\text{STOP} = C99 \cdot \text{UPDOWN} + C00 \cdot \text{UPDOWN}$$

- C00 es un valor lógico que es `1´ al existir una indicación `00´.
- C99 es `1´ en presencia de indicación `99´. Las dos variables tienen valor `0´ en las demás condiciones.
- UPDOWN es una variable activa en 0 que determina si el conteo crece o decrece. Se alimenta a los circuitos contadores 74190. (Ver anexo 3)

La señal STOP, va a ser `1´ de dos eventos:

- Que el conteo sea creciente y llegue a `99´.
- Que el conteo sea decreciente y llegue a `00´. La señal UPDOWN=`1´

Los eventos en que C99 y C00 sean ambos `1` nunca suceden porque el conteo del *display* no puede valer `00` y `99` al mismo tiempo. Esta observación permite simplificar la ecuación al no considerar esos eventos improbables.

La señal de habilitación se activa cuando el sentido de conteo se invierte. La señal STOP se suministra a los contadores para inhibir el conteo como se muestra en el Anexo 3.

4.3.5 Detección de límites máximos y mínimos de nivel

El nivel en control manual no debe sobrepasar los límites máximos y mínimos. Para el valor máximo, se puede escoger entre el 80 y 90% del nivel con un interruptor que selecciona entre estos valores. El valor prefijado como consigna, solo es una referencia para disparar una alarma lumínica y sonora que indique que un nivel peligroso ha sido alcanzado. El operador debe tomar las acciones pertinentes para que cese la alarma, en este caso, no permitir entrada de agua tratada al tanque y el nivel bajará si hay producción de hidrógeno.

En control automático, el nivel se mantiene estable en el valor prefijado sin llegar a los valores límites.

El valor mínimo de nivel puede seleccionarse con otro interruptor para seleccionar entre 20% y 30%.

El método con que se detecta un nivel máximo o mínimo es con comparadores de magnitud 7485, que permiten comparar dos datos de A y B de 4 bytes, ofreciendo a la salida una señal $A > B$, otra $A < B$ y una tercera $A = B$.

En este diseño, el dato A del comparador 7485 será el valor límite de 80%-90% de llenado máximo o 20%-30% de llenado mínimo. La indicación de nivel máximo será la señal " $A < B$ " del circuito 7485 en caso contrario, se enciende una alarma sonora y lumínica indicando valor de nivel peligroso.

En el Anexo 5 se presenta el circuito desarrollado. Para el detector de valores por debajo de 30% o 20%, el número A, que se compara en el 7485

en código BCD se compone de A3A2A1A0, siendo los valores de A3A2A1=001, mientras que A0 puede variar entre `0´ y `1´ por medio de un interruptor. Los valores lógicos de `1´ se obtienen conectando esa entrada a +5V, mientras que los valores `0´ se obtienen conectando las entradas a tierra.

Para el detector de nivel por encima de 80% o 90%, el numero A en código BCD se compone de A3A2A1A0, siendo los valores de A3A2A1=100, mientras que A0 puede variar entre `0´ y `1´ por medio de un interruptor. Los valores comparados son 8 o 9.

En los dos casos anteriores, el numero B que se compara es la salida BCD del contador de décadas.

4.4 Simulación de la dinámica del electrolizador

4.4.1 Alimentación de potencia eléctrica

En capítulos anteriores se aclaró que la potencia a la que trabaja un electrolizador no debe ser menor que cierto límite especificado por el fabricante. Operar el electrolizador por debajo de esa potencia puede ser peligroso, por los riesgos de explosión asociados a la formación de burbujas de H₂ en el compartimento de producción de O₂ y viceversa. Por tanto, al suministrar energía eléctrica es necesario controlar que la potencia no baje de ese límite.

También es necesario limitar el valor máximo de esa potencia nominal.

4.4.2 Simulación de la energía suministrada por la fuente de energía renovable

El voltaje de alimentación de fuentes renovables simulado VREN, equivalente al voltaje generado por celdas solares, aerogenerador u otro tipo de energía no proveniente de combustibles fósiles se elabora utilizando un potenciómetro helicoidal que puede variar el voltaje desde 0V hasta 15V.

Este voltaje se suministra a la entrada de un circuito que se detallará a continuación.

4.4.3 Circuito convertidor V-I

El voltaje presente a la entrada de la fuente es medido. Se tomó como patrón del electrolizador hipotético, la curva voltaje – corriente del trabajo de (Khater, Abdelraouf, & Mohamed, 2011). En este trabajo se representa el voltaje en el eje x como variable independiente y la corriente en el eje y como variable dependiente, asumiendo que el electrolizador tendrá tres celdas en serie, por lo que los voltajes de la figura 3.1 se multiplican por 3. Por su parte el eje Y representa la densidad de corriente en A/cm^2 , en lugar de mA/cm^2 .

La tabla 4.1 se construyó basada en la figura 3.1 con los supuestos anteriores.

Voltaje a la entrada de las tres celdas. V	Densidad de corriente en el electrolito. A/cm^2
4.17	0.012
4.29	0.025
4.53	0.050
4.80	0.100
4.98	0.150

Tabla 4.1 Relación de voltaje en electrolizador de tres celdas con la densidad de corriente en el electrolito.

Fuente: Autores utilizando datos de figura 3.1

La curva fue ajustada con métodos de regresión disponibles en la Internet, seleccionando la curva más simple que no perdiera la precisión requerida por el modelo. Se muestra en la figura 4.3, donde puede apreciarse la característica no lineal de la relación V-I. La ecuación de regresión de la figura es:

$$I \left(\text{A/cm}^2 \right) = 2 - 1.02V + 0.13V^2$$

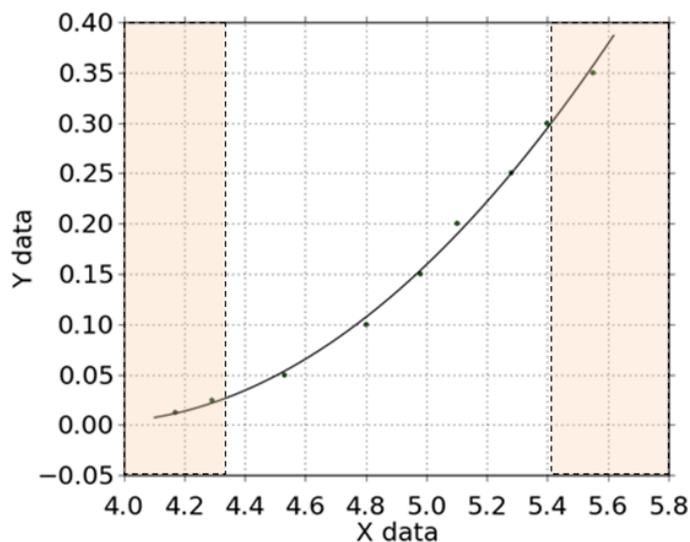


Figura 4.3 Relación entre voltaje de entrada del electrolizador de 3 celdas y la densidad de corriente.
Fuente: Autores.

La corriente nominal de operación de este equipo simulado se asumirá como de 0.3 A/cm^2 , mientras que el mínimo de corriente será 0.03 A/cm^2 , equivalente al 10% de la corriente nominal. De la curva anterior se puede ver que para la corriente nominal $V=5.42$ y para la corriente mínima de operación el voltaje de entrada es 4.37 V . Ese voltaje es el mínimo al cual comienza a operar el electrolizador.

4.4.3 Convertidor de voltaje a corriente

La señal equivalente a la “corriente” circulante por el electrolizador es simulada en el equipo construido como un voltaje que reproduce la curva de la figura 3.1. Para representar la alinealidad de esa curva se realizó un circuito amplificador con tres ganancias y tres ajustes DC diferentes, implementado con un amplificador operacional.

La función se comporta de la siguiente manera:

$$\begin{cases} I = 0.102V - 0.415 & \text{para } 0 < V < 4.45 \\ I = 0.225V - 0.970 & \text{para } 4.46 < V < 5.03 \\ I = 0.384V - 1.770 & \text{para } 5.03 < V < 5.50 \end{cases}$$

Se empleó un amplificador operacional con ganancia variable, empleando dos relés que desconectan y conectan resistores que modifican la ganancia y el offset del amplificador. Los puntos de cambio están situados en los voltajes 4.45V y 5.03, que varían la ganancia para hacer la curva descrita. De esta forma se modeló un comportamiento similar a la corriente del electrolizador.

Dos comparadores LM339 miden los voltajes y conectan convenientemente los relés.

Puede observarse en la figura 4.4 el resultado de la curva construida mediante tres líneas rectas y su aproximación.

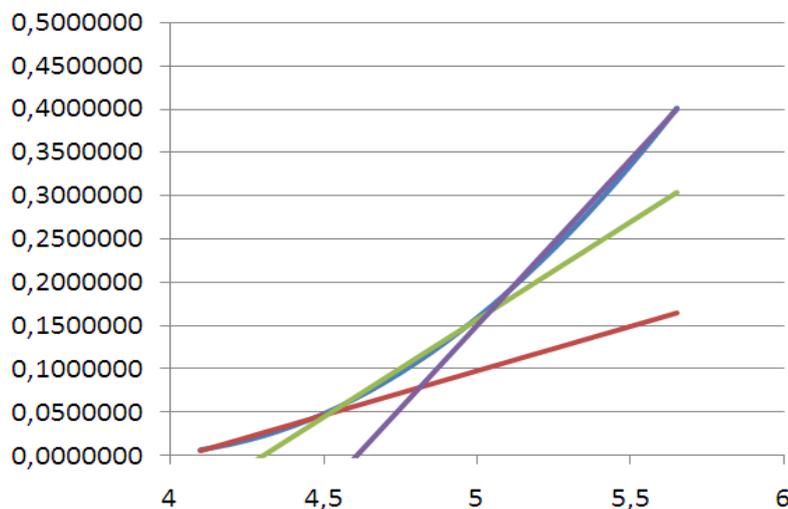


Figura 4.4 Reducción de la curva a tres líneas rectas que la representan.
Fuente: Confección por los autores utilizando Microsoft Excel.

4.4.4 Limitación de corriente máxima al valor nominal de diseño

La corriente será limitada a la corriente nominal $0.3A/cm^2$. En el circuito la corriente se representa con un voltaje que se escala para el cual I_{nom}

coincide con 5V. Se suministra este voltaje a un limitador con diodo Zener de 5V. Se utiliza un comparador para detectar cuando el voltaje es 3V, utilizándose la salida de este para señalar "Corriente nominal". No es motivo de alarma, solo se informa que el electrolizador trabaja a máxima capacidad con su corriente de diseño.

La señal PH representará la producción de hidrógeno que es directamente proporcional al valor de la corriente.

4.4.5 Circuito convertidor de voltaje a frecuencia

Para simular la producción de hidrógeno en el electrolizador, se diseñó un circuito que recibe el voltaje analógico PH y lo utiliza para modular la frecuencia de un pulso de onda cuadrada con el que se elabora la señal del reloj del contador que simula el nivel de líquido en el electrolizador. (Ver anexo 4)

Se utilizó un circuito temporizador basado en la monitorización del voltaje de carga de un capacitor C_t (C_1 , $10\mu\text{F}$) a través del resistor R9, formando un circuito RC. El voltaje PH se conduce con un seguidor de voltaje IC3A, alimentándose como voltaje de referencia al comparador IC3B, para finalizar el periodo de carga del capacitor. Se logra así variar el tiempo de oscilación. IC3C es un comparador que detecta cuando el capacitor C_t tiene voltaje 0V. Los diodos D1-D4 limitan el voltaje de salida de los comparadores al rango de 0V a 5V. Se utiliza un circuito biestable 7474 operado asincrónicamente como circuito de control de las oscilaciones. La señal de IC3B (detección del voltaje máximo de C_t) se lleva a la entrada PRESET del biestable IC4B, mientras que la señal de IC3C se lleva a la entrada CLEAR. La salida Q negada se utiliza para provocar la descarga del capacitor de tiempo C_1 , a través de los transistores Q1 y Q2.

4.4.6 Lógica de control de los contadores

Adicionalmente se necesitan señales para contar adecuadamente y detener el conteo. Cada señal es elaborada teniendo en cuenta las variables de entrada.

Son tres señales: DIVCLK2, UPDOWN Y ENACONT. Se explicará a continuación el procedimiento para cada variable.

4.4.6.1 Señal UPDOWN

La variable entrada de agua tratada EAT es tomada como booleana, una válvula ON/OFF bloquea o deja pasar líquido al interior del electrolizador, siendo su valor `1` cuando la energía está aplicada y `0` cuando la energía no está aplicada.

Por su parte la variable EE significa energía eléctrica suministrada al electrolizador. Es un valor booleano también, siendo su valor `1` cuando la energía está aplicada y `0` cuando la energía no está aplicada.

Se realizó un análisis del comportamiento deseado de la variable UPDOWN, que es la que determina la dirección del conteo arriba o abajo en el indicador de nivel, y que depende de las variables anteriores EE y EAT, arribando a la tabla 4.2, mostrada a continuación.

EE	EAT	UPDOWN	Observaciones
0	0	X	No interesa su estado, porque en este caso, el conteo se detiene con la señal ENACONT, por lo que se considera opcional.
0	1	0	El nivel sube al haber entrada de agua. El conteo es ascendente.
1	0	1	El nivel baja al existir suministro de corriente. El conteo es descendente
1	1	0	El nivel sube porque se asume que el balance de líquido que entra y el que se gasta es positivo.

Tabla 4.2 Análisis de las posibilidades de variables de entrada para la señal UPDOWN (Dirección del conteo)

Fuente: Autores.

Se realizó un análisis de las posibilidades de la función lógica estudiada con el método de simplificación de Mapas de Karnaugh. Después de simplificar el valor de la variable UPDOWN en función de EE y EAT, se concluye que:

$$UPDOWN = \overline{EAT}$$

Se puede apreciar en la ecuación resultante que la variable UPDOWN se obtendrá negando la variable EAT. Nótese que la variable EE no tiene efecto en la variable de salida. Esto es producto de la simplificación asumida en este modelo, en el cual no se profundiza en la dinámica real de un proceso, sino que se trata de ofrecer el comportamiento más probable para reproducirlo en el simulador. La interpretación del resultado asumido es que el nivel sube cuando hay entrada de agua y energía aplicada a la vez.

4.4.6.2 Señal ENACONT

Esta señal se utiliza para bloquear el conteo del simulador de nivel de líquido bajo ciertas condiciones.

Si se cumplen las dos condiciones siguientes:

- Se interrumpe la alimentación de corriente al electrolizador, (representado por la señal EE con valor lógico "0").
- No hay entrada de agua tratada, (representado por la variable EAT con valor "0").

Entonces la señal ENACONT es '1'. En las otras variantes vale '0'. Esto significa que el conteo se detiene. O sea, que la indicación del nivel permanece sin variación.

La señal ENACONT queda conformada como una función lógica NOR:

$$ENACONT = \overline{EE + EAT}$$

4.4.6.3 Señal DIVCLK

Se decidió programar la señal DIVCLK para diferenciar el comportamiento del nivel del líquido en el electrolizador en presencia de diferentes combinaciones de eventos de las variables de entrada EE y EAT.

La señal DIVCLK se hace activa cuando se dan las siguientes condiciones al mismo tiempo.

- EE tiene valor lógico "1". Esta señal representa que existe energía eléctrica suministrándose al electrolizador cuando la corriente está entre la Corriente mínima I_{min} y el valor nominal I_{nom} .
- EAT tiene valor lógico "1". Esta señal representa la entrada de agua tratada al electrolizador. Puede representar una señal de activación de una válvula de control.

O sea, los valores lógicos de las variables EE y EAT son "1". Esto significa que a la vez, entra agua tratada al electrolizador y se suministra energía eléctrica desde P_{min} a P_{nom} del electrolizador. Se simplifica el diseño asumiendo que el líquido que entra siempre es mayor que el que sale y por tanto, el balance de líquido es positivo, o sea, aumenta el nivel (conteo creciente), aunque a menor velocidad.

La diferencia prevista en el conteo o indicación de nivel es que CLK1 sea la mitad del conteo para valores de $EAT=1$ y $EE=1$ y sea el conteo normal para valores diferentes de EE y EAT.

Se utiliza la señal DIVCLK2 para controlar el paso de la señal de reloj con esas condiciones. La división de frecuencia se hace con un biestable D conectado como divisor binario por 2. Finalmente, se deja pasar la señal CLK1 sin cambios o CLK1/2. Utilizando compuertas lógicas controladas por la señal DIVCLK2.

4.5 Construcción del simulador

Se diseñó el panel frontal del simulador que está en el Anexo 2. El panel contiene las variables que intervienen en el proceso de control de nivel y

contiene indicadores lumínicos. Las variables de voltaje eléctrico se suministran con un potenciómetro. Un interruptor maneja las variables booleanas de entrada de agua tratada en control manual. Se señalizan todos los eventos importantes y alarmas explicados en este capítulo. Las figuras 4.5, 4.6, 4.7 muestran las placas de circuito de varios bloques del simulador durante la etapa de construcción del prototipo.

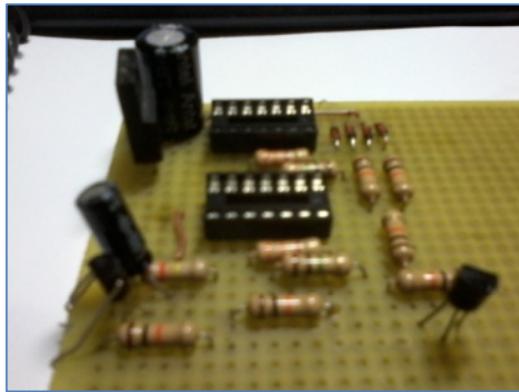


Figura 4.5 Placa del generador de pulsos controlado por voltaje en construcción.

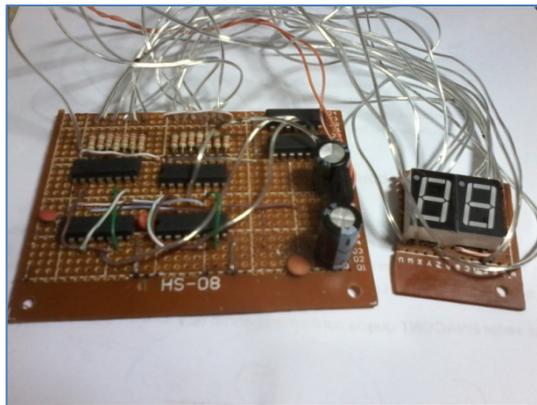


Figura 4.6 Placa del contador bidireccional durante el proceso de construcción del prototipo.

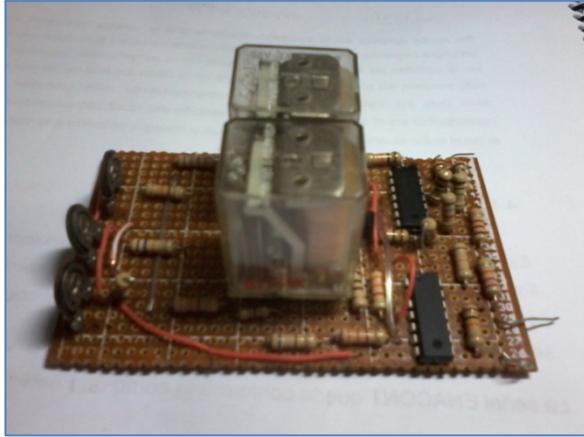


Figura 4.7 Placa de entrada y simulador de curva V-I.

Conclusiones

Los autores al proponer el simulador de electrolizador como herramienta didáctica para la práctica de control automático de procesos, concluyen expresando que:

La sistematización teórica, permitió a los autores familiarizarse con criterios existentes en el ámbito internacional, ampliar y profundizar en contenidos relacionados con la producción de energía en el mundo y alternativas al uso de combustibles fósiles, uso y producción de hidrógeno mediante electrolizadores y automatización de estas plantas, referentes que le permiten a los autores, el sustento para la propuesta del diseño y la implementación del equipo “Simulador de electrolizador” en el laboratorio de la Carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

La técnica de la encuesta permitió a los autores a partir de su análisis e interpretación, valorar la importancia de incluir contenidos relacionados con el control automático de instalaciones que aprovechen las fuentes de energía renovables en las actividades curriculares o extracurriculares de la formación del ingeniero en Electrónica, Control y Automatismo, así como identificar aspectos esenciales para desarrollar el aprendizaje de los contenidos de esta materia con la aplicación del simulador propuesto por los autores.

Se identificaron las variables necesarias para la operación segura de un electrolizador, siendo utilizada esta información para modelar las variables relacionadas con el nivel del líquido dentro del electrolizador.

Se construyó un equipo simulador electrónico que permite modelar el nivel de líquido en el electrolizador a partir de modelo matemático simplificado y

controlar esa variable (nivel de líquido), a partir de la variación de las entradas simuladas de energía eléctrica y flujo de agua tratada. Este equipo puede ser utilizado en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo, para contribuir al desarrollo de competencias necesarias en la aplicación de las técnicas de control en instalaciones de aprovechamiento de energías renovables.

Con este trabajo se incentiva y despierta el interés de los graduados por las tecnologías “verdes”, en especial el uso del hidrógeno como combustible. Es un punto de partida, que influye en la sensibilización de los ingenieros en Electrónica, Control y Automatismo con el cuidado del medio ambiente y el aumento de la calidad de vida de la sociedad.

Recomendaciones

Después de concluir el presente trabajo en opción al título de Ingeniero en Electrónica, Control y Automatismo, los autores recomiendan que:

Se desarrollen contenidos en las actividades curriculares o extracurriculares, que permitan a los estudiantes familiarizarse con las plantas de aprovechamiento de energías renovables y producción de hidrógeno, así como su automatización, contribuyendo así con la asimilación de esta modalidad de uso de energía.

Que se utilice el simulador confeccionado para acercar a los estudiantes a este tipo de tecnología y de esta forma profundicen en el tema, de forma que tenga continuidad mediante investigaciones y propuestas afines, por ejemplo, enriqueciendo el modelo de electrolizador con otras variables que aumenten su desempeño.

Glosario de términos

<u>VARIABLE</u>	<u>DESCRIPCIÓN</u>
20/30	Señal booleana que está implementada con un interruptor de dos posiciones en el panel frontal para suministrar valores lógicos de "1" o "0". La señal vale "0" para el límite del 80% de llenado y vale "1" para el límite de 90% de llenado.
80/90	Señal de tipo booleana que está implementada con un interruptor de dos posiciones en el panel frontal para suministrar valores lógicos de "1" o "0". La señal vale "0" para el límite del 20% de llenado y vale "1" para el límite de 30% de llenado.
C00	Señal booleana que es "1" cuando el conteo en el display muestra la indicación "00" y "0" en los demás casos. Se utiliza para evitar un cambio de indicación en display de "00" a "99" mediante el control de la habilitación del conteo de cada contador bidireccional del tipo 74LS190.
C99	Señal booleana que es "1" cuando el conteo en el display muestra la indicación "99" y "0" en los demás casos. Se utiliza para evitar un cambio de indicación en display de "99" a "00" mediante el control de la habilitación del conteo de cada contador bidireccional del tipo 74LS190.
CLK	Señal de reloj generada para ser procesada por la lógica de generación de señal de reloj para el contador bidireccional que simula nivel de líquido en el electrolizador.
CLK2	Señal de reloj generada en los circuitos lógicos de generación de señal de reloj que va al contador bidireccional. Puede ser activa, inactiva y su frecuencia varía.

DIVCLK	Señal booleana que cuando es activa en "1" provoca que CLK2 sea la mitad de CLK. En caso contrario CLK y CLK2 tienen la misma frecuencia. Depende de las señales EAT y EE.
EAT	Es un valor booleano que indica la apertura o cierre de una válvula del tipo ON/OFF que permite la entrada de agua tratada al tanque electrolizador. Si el valor es "1", la válvula está "abierta" y "entra" agua al electrolizador, "aumentando el nivel de líquido.
EE	Variable booleana que indica el paso de energía eléctrica por el electrolizador. Si es "1" indica que existe corriente circulando. En caso contrario no hay corriente.
ENACONT	Esta variable booleana permite el conteo mientras su valor lógico sea "0". Cuando este valor es "1" el conteo se inactiva, permaneciendo en el display el último número que existía antes de cambiar esta señal de estado. Depende de las variables EAT y EE.
PH	Variable analógica de voltaje que es proporcional a la corriente simulada en el electrolizador. Simula la producción de hidrógeno en el electrolizador por existir una proporcionalidad directa entre la corriente y la producción de hidrógeno.
PMIN	Potencia mínima a la que opera un electrolizador. Es un dato que suministra el fabricante. Generalmente es el 10% de la carga nominal del equipo.
PNOM	Potencia máxima y de diseño a la que opera un electrolizador. Es un dato que suministra el fabricante. No debe sobrepasarse por motivos de seguridad.
STOP	Señal de parada para evitar que el conteo cambie de "00" a "99" y viceversa. Depende de las señales booleanas C99, C00 y de la dirección del conteo (señal UPDOWN).

UPDOWN	Señal booleana que define la dirección del conteo mostrado en el display. Es "1" para conteo descendente y "0" para conteo ascendente. Depende de la señal EAT.
VREN	Voltaje continuo que simula la entrada de energía eléctrica procedente de fuentes renovables como paneles solares o aerogenerador.

Bibliografía

1. *Aguinaga, A.* (2009). Diseño y construcción de un prototipo de planta dispensadora de hidrógeno doméstica, con electrolizador híbrido, solar y eléctrico. *Revista Politécnica Quito (EPN)* , 30 (1), 10-20.
2. *Alaska Center for Energy.* (2012). University of Alaska. Cornerstone News an Information. Retrieved 12 2013, from Light inspects ACEP's battery bank: <http://uacornerstone.net/light-inspects-aceps-battery-bank/>
3. *Basagoitia García, J. A.* (2011). Política energética: obtención de hidrógeno mediante electrólisis del agua con energía solar. Una aproximación teórica. (U. d. Salvador, Ed.) Recuperado el 2013, de <http://redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/273/1/56705.pdf>
4. *Bujlo, P., Pasciak, G., & Chmielowiec, J.* (2013). Experimental Evaluation of Supercapacitor-Fuel Cell Hybrid Power Source for HY-IEL Scooter. *Journal of Energy* , 2013, 5.
5. *Camocardi, P. A., Toccaceli, G. M., & Battaiotto, P.* (2011). Producción de H₂ basada en GDR y asistida por red débil. topología, operación y control del sistema. Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011, (pág. 6). Argentina.
6. *Cirre, C. M., Valenzuela, L., Berenguel, M., & Camacho, E. F.* (2004). Control de plantas solares con generación automática de consignas. *Revista Iberoamericana de Informática y Automática Industrial* , 1 (1), 55-56.
7. *Claneco S.A Chile.* (1 de 2013). Las plantas solares de la India sufren un contratiempo y se retrasan. Obtenido de Claneco SA: <http://www.claneco.com/cl/las-plantas-solares-de-la-india-sufren-un-contratiempo-y-se-retrasan/>
8. *Colucci Ríos, J. A.* (2009). Aplicaciones de las celdas combustibles en Puerto Rico. Tecnología totalmente amistosa. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/colucci.pdf>

9. *Durán Leirado, J. E.* (2007). Energía Solar Fotovoltaica. Recuperado el 12 de 2013, de <http://morato2a.blogspot.com/2007/04/energa-solar-renovable.html>
10. *Engel, R., & Basualto, A.* (2010). Hidrógeno y celdas combustibles. Obtenido de Biblioteca de Cubasolar: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia16/HTML/articulo05.htm>
11. *Fairchild Semiconductor.* (1995). DM74LS190 Synchronous 4 bit Up/Down counters with mode control. Retrieved 12 2013, from http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/51077/FAIRCHILD/DM74LS47/+_11J8UwYhRDpKxHeIT.DudGI+/datasheet.pdf
12. *Fierro, J. L.* (2012). Producción de hidrógeno mediante precursores renovables. Recuperado el 12 de 2013, de http://www.urjc.es/fundacion/cursos_verano/ponencias/tecnologias_energeticas/Presentaciones_Curso%20Aranjuez%202010/10_Jose%20Luis%20Garcia%20Fierro_Produccion%20de%20H2%20mediante%20renovab.pdf
13. *Franz, L.* (2013). Parque eólico de Loja. Recuperado el 12 de 2013, de Loja City: <http://lojacity.com/parque-eolico-loja/>
14. *García-Mauricio, R. A.* (2012). Centrales Eléctricas. Obtenido de <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo7.html>
15. *Gómez Cisneros, C. H.* (2012). Celdas de hidrógeno. Recuperado el 12 de 2013, de <http://energiaunam.wordpress.com/2010/03/12/celdas-de-hidrogeno/>
16. *Griesshaber, W., & Sick, F.* (1991). Simulation of Hydrogen-Oxygen Systems with PV for the Self-Sufficient Solar House. Freiburg im Breisgau, Alemania: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
17. *Holgado Secas, H.* (2012). Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis. Proyecto final de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Facultat de Nàutica de Barcelona, Barcelona, España.
18. *Horizon Fuel Cell Technologies.* (2013). Horizon Fuel Cells. Retrieved from <http://www.horizonfuelcell.com/#!/fuel-cell-stacks/c23wk>

19. *Huete Guzmán, M.* (2012). Ensayo de un electrolizador. Recuperado el Diciembre de 2013, de Universidad Pontificia de Comillas, Madrid: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/5051b75229ccb.pdf>
20. *Hug, W., Bussmann, H., & Brinner, A.* (1993). Intermittent operation and operation modeling of an alkaline electrolyzer. *International journal of hydrogen energy* , 2 (18), 973-977.
21. *International Energy Agency.* (2013). World energy Outlook 2013. Obtenido de http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2013_Executive_Summary_Spanish.pdf
22. *International Energy Association.* (2013). World Energy Outlook Executive Summary. Obtenido de <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,44380,en.html>
23. *Khater, H. A., Abdelraouf, A. A., & Mohamed, H.* (2011). Optimum Alkaline Electrolyzer-Proton Exchange Membrane Fuel Cell Coupling in a Residential Solar Stand-Alone Power System. (H. P. Corporation, Ed.) Retrieved 2013, from ISRN Renewable Energy: <http://dx.doi.org/10.5402/2011/953434>
24. *LeRoy, R. L.* (1983). Industrial water electrolysis: present and future. (Elsevier, Ed.) *International journal of hydrogen energy* , 8 (6), 401–417.
25. *Lineo Ávila, F. G.* (2004). Controlador de módulo de celda de combustible mediante la herramienta Labview. Tesis de Ingeniero Electricista. (U. d. Chile, Ed.) Recuperado el 2013, de http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/Memoria_FC_flineo.pdf
26. *Martínez, R. F.* (2011). Evaluación del desempeño de métodos experimentales de identificación a lazo abierto. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* , 32 (2).
27. *Meyer, G., Caneiro, A., Corso, H., Ponce, V., & Azcona, A.* (6 de 2004). El Centro Atómico Bariloche y la tecnología del Hidrógeno. (CNEA, Ed.) Recuperado el 12 de 2013, de http://www2.cab.cnea.gov.ar/ieds/extras/Plan_CAB_actividades_H_2.pdf

28. *Ministerio de Electricidad y Energías Renovables*. (2013). Proyectos Emblemáticos. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/proyectos-emblematicos-2/>
29. *Ministerio de Relaciones Exteriores de Dinamarca*. (2013). Sitio Web de la República de Dinamarca. Recuperado el 12 de 2013, de Wind Energy: <http://denmark.dk/en/green-living/wind-energy/>
30. *Montes, M. J., Abánades, A., & Martínez-Val, J. M.* (2010). Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Recuperado el diciembre de 2013, de Energía Sostenible .net: Disponible es: <http://www.energiasostenible.net/DVD/H2solar.pdf>
31. *National Semiconductor*. (n.d.). DM74LS190 Up Down counter with mode control. Retrieved from http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/103418/NSC/DM74LS190/+00_W3-VIRwa.OzYPZNhY+/datasheet.pdf
32. *Nocera, D.* (2009). Energía Personalizada. Pop Tech. Massachussets Institute of Technology. Retrieved from Youtube: <http://www.youtube.com/watch?v=KTtmU2ID97o>
33. *Ocean Power Technologies*. (2011). Kanehone Bay, Oahu, Hawaii, Project at Marine Corps Base Hawaii (MCBH). Retrieved 12 2013, from <http://www.oceanpowertechnologies.com/hawaii.html>
34. *Ocean Power Technologies Inc.* (2013). Autonomous Power Systems. Recuperado el 2013, de http://www.oceanpowertechnologies.com/PDF/OPT_APB350_Sept2013.pdf
35. *Ogata, K.* (1998). Ingeniería del Control Moderna. México: Prentice Hall.
36. *Pelamis Wave Power Ltd.* (2013). Pelamis Wave Power. Obtenido de http://www.pelamiswave.com/upload/document/Pelamis_Wave_Power_brochure.pdf
37. *Pelamis Wave Power*. (2013). Scottish Power Renewables at EMEC. Retrieved 12 2013, from <http://www.pelamiswave.com/our-projects/project/2/ScottishPower-Renewables-at-EMEC>
38. *Pino Lucena, F. J.* (2010). Análisis de Sistemas Integrados de Producción de Hidrógeno a partir de Energía Eólica. Aportaciones al modelado dinámico de sistemas, Biblioteca Digital de la Universidad de

Sevilla. España: <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/1327/analisis-de-sistemas-integrados-de-produccion-de-hidrogeno-partir-de-energia-eolica-aportaciones-al-modelado-dinamico-de-sistemas/>

39. *Rescompass.org*. (2012). Energías Renovables y Verdes. Recuperado el 12 de 2013, de <http://www.renovablesverdes.com/dinamarca-en-el-2020-el-42-de-la-energia-vendra-producida-por-el-viento/>
40. *Solar Paces*. (2010). Solar Power and Chemical Energy Systems Implementing Agreement of the International Energy Agency. Retrieved from http://www.solarpaces.org/Library/docs/Solar_Fuels.pdf
41. *Steward, D., Ramsden, T., & Harrison, K.* (2010). Hydrogen for Energy Storage Analysis Overview. Retrieved from NREL: <http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/48360.pdf>
42. *Texas Instruments*. (2000). Digital IC's Databook. Texas Instruments.
43. *Ynovex Pty Ltd*. (2013). Hydropak, portable energy solution for off grid use. Retrieved 12 2013, from http://www.ynovex.com/fuel_cell/hydropak.html

ANEXOS

Anexo 1. Encuesta dirigida a: Egresados de la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo

OBJETIVO:

Lograr mejora continua en la formación integral para el desempeño de los ingenieros en Electrónica, Telecomunicaciones y Control Automático.

ORIENTACIÓN AL INFORMANTE:

Para desarrollar este instrumento, sírvase escribir la alternativa que considere según su opinión. No olvide que de su respuesta depende el éxito de la investigación que se realiza.

I- INFORMACIÓN GENERAL:

Experiencia como profesional:

- a) Graduado 2012
- b) Graduado 2013

II- INFORMACIÓN GENERAL:

1- La búsqueda y asimilación de tecnologías para sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, usted las considera:

- a) Muy importante
- b) Poco importante
- c) No es importante

2- ¿Recibió en su formación académica contenidos para automatización de procesos en sistemas de aprovechamiento de energías renovables?

- a) En 1ro
- b) En 2do
- c) En 3ro
- d) En 4to
- e) En 5to
- f) No recibió

3- ¿Cuál es su opinión en relación a los conocimientos de tecnologías de utilización de energías renovables en su futuro desempeño profesional?

- a) Necesario.
- b) Poco necesario.
- c) No necesario.

4- ¿Sabe usted las ventajas del Hidrógeno como vehículo para almacenar energía? Mencione algunas.

5- ¿Sabe que es un electrolizador?

- a) No
- b) Si

6- ¿Conoce el principio de funcionamiento de un electrolizador?

7- ¿Conoce que variables son importantes controlar en un electrolizador?

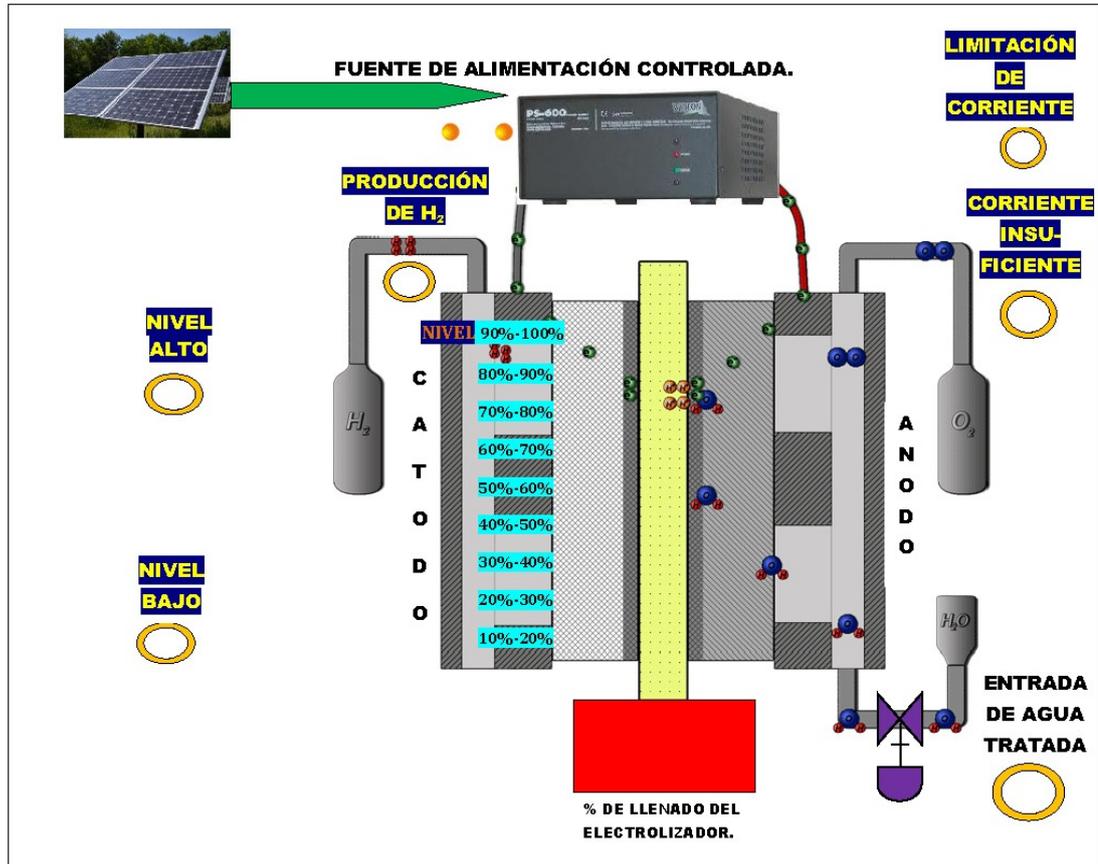
8- ¿Cuál es su opinión sobre la necesidad de diseñar un medio didáctico para el aprendizaje inicial del control automático de electrolizadores?

a) Muy necesario

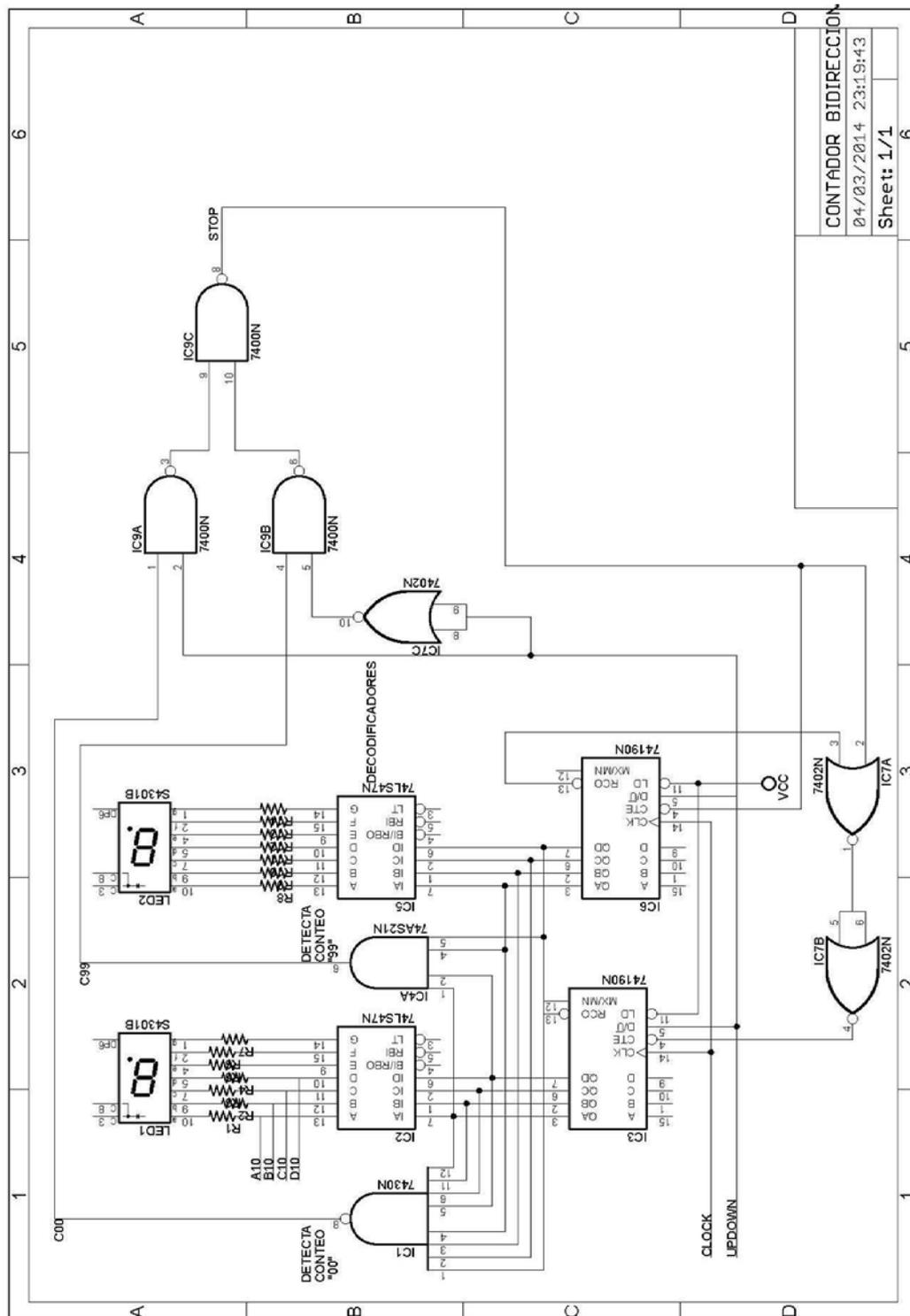
b) Poco necesario

c) Innecesario

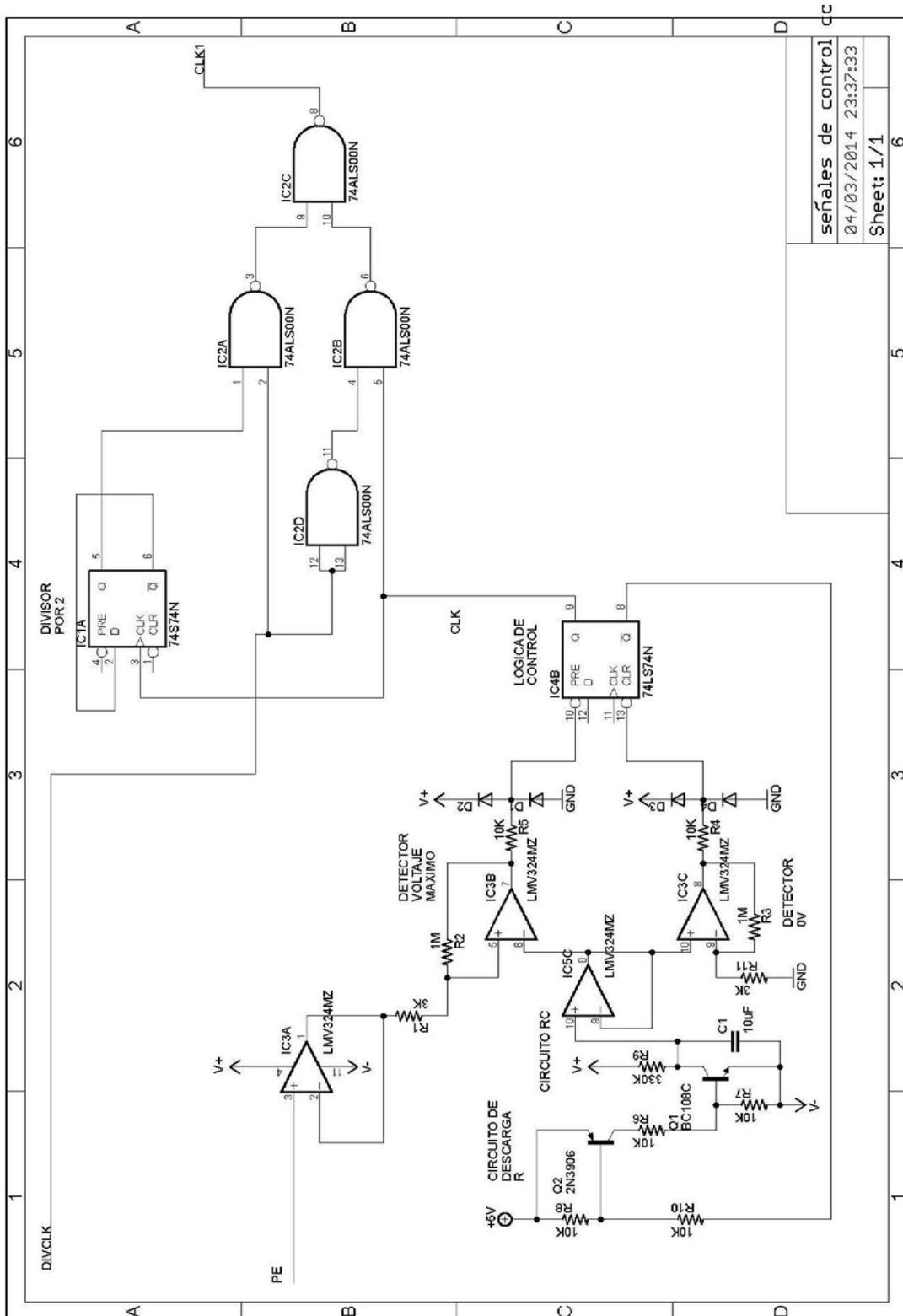
Anexo 2. Panel del simulador sin incluir los elementos para control manual y automático



Anexo 3. Contador bidireccional simulador de nivel de electrolizador

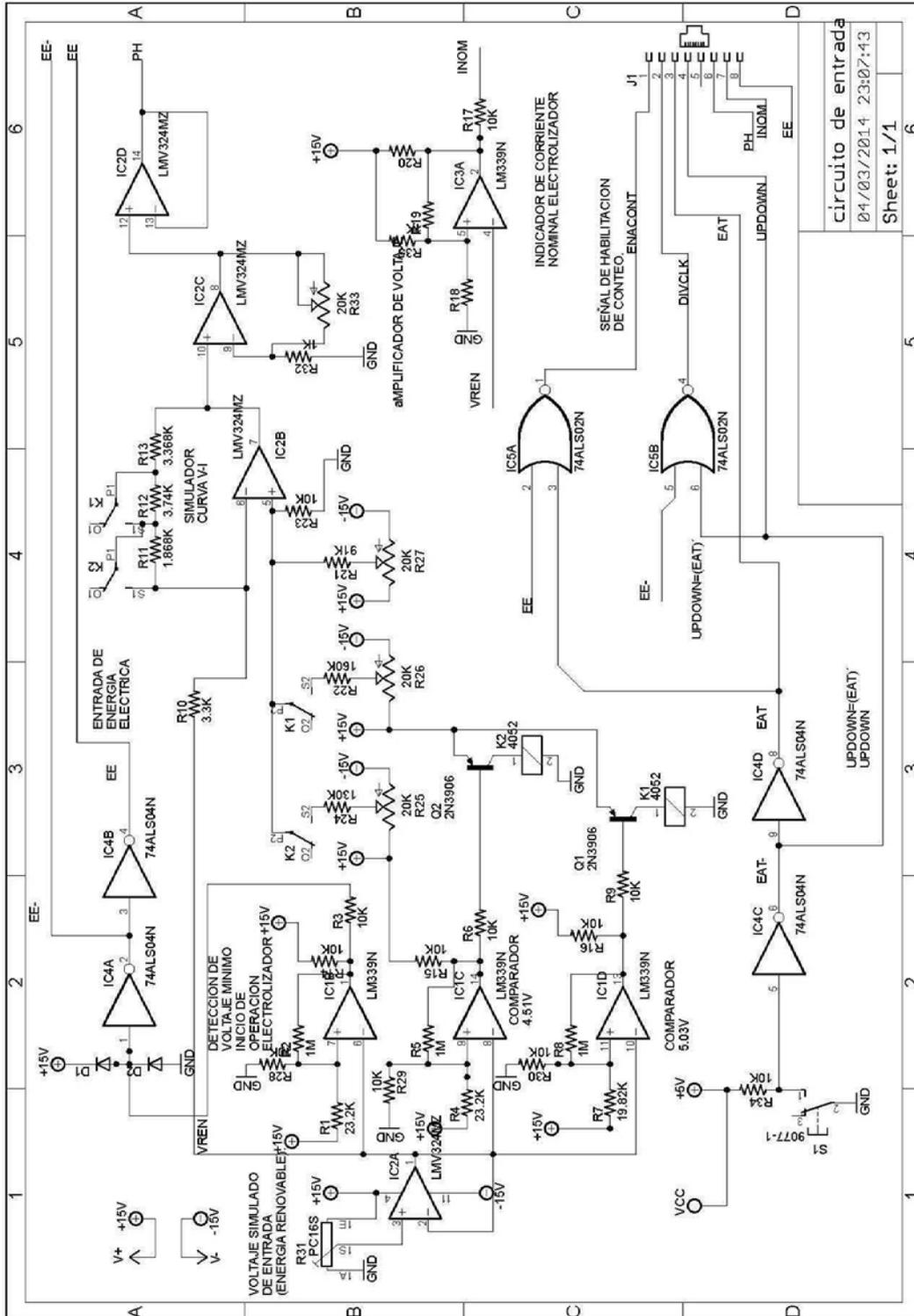


Anexo 4. Señales de control para contadores



señales de control	cc
04/03/2014 23:37:33	
Sheet: 1/1	6

Anexo 6. Circuito de entrada y simulación de curva V-I



circuito de entrada
04/03/2014 23:07:43
Sheet: 1/1