

**PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE SOLUCIONES ALCOHÓLICAS  
POR ELECTRÓLISIS FOTOASISTIDA**

**YANETH XIMENA HIGUERA PUELLO**

**LEIDY JOHANA TRESPALACIOS LEÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BUCARAMANGA**

**2010**

**PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE SOLUCIONES  
ALCOHÓLICAS POR ELECTRÓLISIS FOTOASISTIDA**

**YANETH XIMENA HIGUERA PUELLO**

**LEIDY JOHANA TRESPALACIOS LEÓN**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico.

**Director:**

**Dr . JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA**

Doctor en Química

**Codirector:**

**Dr. DIONISIO LAVERDE CATAÑO**

Doctor en Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BUCARAMANGA**

**2010**

*Al Padre todopoderoso por ser mi luz en todo momento.*

*A mi madre por hacer mi sueño, su sueño y volverlo realidad.*

*A mi hermano que quería ver a la niña de la casa convertida en una gran mujer.*

*Yaneth Ximena Higuera Puello*

*A Dios por brindarme la fuerza para afrontar cada día;  
A mis padres Stella y Álvaro, por el amor, la comprensión y el apoyo incondicional;  
A mi hermano Julián y demás familiares, por el cariño y la ayuda desinteresada;  
A mis amigos por hacer de esta una etapa inolvidable.*

*Leidy Johana Jrespacios León*

## **AGRADECIMIENTOS**

A los doctores Julio Andrés Pedraza Avella y Dionisio Laverde Cataño por su orientación, apoyo y comprensión.

Al estudiante de doctorado José Luis Roperó Vega por su colaboración y disposición durante el desarrollo de este proyecto.

Al técnico Ambrosio Carrillo por estar siempre dispuesto a colaborar.

Al laboratorio de materiales cerámicos por facilitar el lugar y los implementos para el desarrollo experimental.

A todos aquellos que contribuyeron a que este proyecto fuera una realidad.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	17
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE .....	19
2.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR SOLUCIONES ORGÁNICAS .....	20
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	7
3.1 Elección de las variables de diseño y operación.....	7
3.2 Montaje y adecuación de la celda.....	8
3.3 Pruebas preliminares .....	10
3.3.1 Evaluación del material de soporte .....	10
3.3.2 Efecto del voltaje en el sistema.....	11
3.3.3 Efecto de la concentración de alcohol .....	11
3.4 Preparación de electrodos .....	11
3.4.1 Preparación de las películas de TiO <sub>2</sub> .....	27
3.4.2 Preparación de las películas de acero platinizado .....	27
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	13
4.1 Evaluación del material de soporte .....	13
4.2 Efecto de la concentración de alcohol .....	30
4.3 Evaluación de los electrodos .....	32
4.3.1 Evaluación del cátodo .....	32
4.3.2 Estabilidad de las películas de TiO <sub>2</sub> .....	33
4.4 Pruebas foto-electrolíticas .....	33
4.4.1 Efecto de las lámparas.....	33
4.4.2 Efecto del número de capas .....	20
5. CONCLUSIONES.....	39
6. RECOMENDACIONES .....	40
7. BIBLIOGRAFÍA .....	41
8. ANEXOS .....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una celda electroquímica para la producción fotoasistida de hidrógeno .....	21
Figura 2. Diagrama de bloques del desarrollo experimental .....	7
Figura 3. Celda fotoelectrolítica utilizada .....	8
Figura 4. Montaje de la celda fotoelectrolítica para la producción de hidrógeno a partir de soluciones alcohólicas .....	9

## LISTA DE GRÁFICAS

- Gráfica 1. Corrientes obtenidas en la electrólisis de soluciones con diferente concentración de NaCl, usando láminas de Ti como ánodo y cátodo ..... 29
- Gráfica 2. Corrientes obtenidas en la electrólisis de una solución con 1500 ppm de NaCl y 0.3 M de NaOH, usando láminas de SS 304 o 316 como ánodo y cátodo. .... 30
- Gráfica 3. Corrientes obtenidas en la electrólisis de soluciones con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y diferente concentración de (a) metanol, (b) etanol o (c) glicerol, usando láminas de SS 316 como ánodo y cátodo ..... 31
- Gráfica 4. Corrientes obtenidas en la electrólisis de soluciones con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% v/v de (a) metanol, (b) etanol o (c) glicerol, usando láminas de SS 316 como ánodo y SS 316 o Pt/SS 316 como cátodo..... 32
- Gráfica 5. Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% v/v de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 125 o 250 W) con y sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1 capa)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo. .... 35
- Gráfica 6. Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% v/v de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 125 o 250W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1, 3 o 5 capas)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo. .... 38

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Corrientes promedio obtenidas y cantidad de H<sub>2</sub> producido a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% V/V de alcohol, mediante electrólisis (2.3 V) y fotoelectrolisis (2.3 V, 125 o 250 W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1 capa)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo..... 34

Tabla 2. Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% V/V de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 125 W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1, 3 o 5 capas)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo. .... 36

Tabla 3. Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% V/V de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 250 W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1, 3 o 5 capas)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo. .... 37

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Electroodos usados en las pruebas fotoelectrolíticas .....	28
ANEXO B. Conductividad eléctrica de las soluciones orgánicas (metanol, etanol y glicerol) a diferentes porcentajes en volumen.....	29
ANEXO C. Estabilidad de las películas de TiO <sub>2</sub> .....	30
ANEXO D. Celda fotoelectrolítica en funcionamiento .....	31
ANEXO E. Cuantificación del flujo de hidrógeno producido con las lámparas de mercurio de alta presión UV-VIS de 125 W y 250 W .....	32
ANEXO F. Corrientes promedio obtenidas y cantidad de H <sub>2</sub> producida con los diferentes alcoholes en fotoelectrólisis con la lámpara de 125 W usando TiO <sub>2</sub> (1, 3 y 5).....	34.
ANEXO G. Corrientes promedio obtenidas y cantidad de H <sub>2</sub> producida con los diferentes alcoholes en fotoelectrólisis con la lámpara de 250 W usando TiO <sub>2</sub> (1, 3 y 5).....	35

## RESUMEN

**TITULO:** PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE SOLUCIONES ALCOHÓLICAS POR ELECTRÓLISIS FOTOASISTIDA\*

**AUTORES:** HIGUERA PUELLO, Yaneth Ximena, y, TRESPALACIOS LEÓN, Leidy Johana\*\*

**PALABRAS CLAVES:** fotoelectrólisis, soluciones alcohólicas, producción de hidrógeno, potencia lumínica.

### DESCRIPCIÓN:

El hidrógeno es considerado la alternativa energética del siglo XXI, por su alto poder calorífico y el aporte ambiental con la eliminación de subproductos de procesos industriales como el metanol, etanol y glicerol. En el presente trabajo se evaluó cada una de las soluciones alcohólicas utilizando un fotoánodo de  $\text{TiO}_2$  con diferente número de capas (1, 3 y 5) realizado por el método sol-gel y un cátodo platinizado hecho por el método de Pechini, soportados sobre acero inoxidable AISI-SAE 316, e iluminados con dos lámparas de alta presión de mercurio de 125W y 250W.

Los resultados obtenidos demostraron que la concentración de alcohol óptima en el sistema es del 10% v/v metanol, etanol y glicerol. Además se observó que un aumento considerable de temperatura, ocasiona que la cantidad de hidrógeno producido sea menor aunque la potencia lumínica sea mayor. El número óptimo de capas disminuye con el aumento de la cadena del alcohol, y la producción de hidrógeno se vio afectada por reacciones paralelas que utilizaron el flujo de electrones para su generación, además no se observaron diferencias significativas entre los alcoholes, debido probablemente al tiempo corto de trabajo y a la baja concentración de alcohol.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Julio Andrés Pedraza Avella. Codirector: Dr. Dionisio Laverde Cataño. Universidad Industrial de Santander.

## ABSTRACT

**TITLE:** HYDROGEN PRODUCTION FROM ALCOHOLIC SOLUTIONS BY ELECTROLYSIS PHOTOASSISTED<sup>\*</sup>.

**AUTHORS:** HIGUERA PUELLO, Yaneth Ximena, y, TRESPALACIOS LEÓN, Leidy Johana <sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS:** Photoelectrolysis, alcoholic solutions, hydrogen production, light potency.

### DESCRIPTION:

Hydrogen is considered the twenty-first century energetic alternative by its high calorific value and environmental contribution by the elimination of sub-products of industrial processes such as methanol, ethanol and glycerol. It was also observed that alcoholic solutions were evaluated in the present work using TiO<sub>2</sub> photo-anode with different numbers of layers (1, 3 and 5), prepared by the sol-gel method and a platinized cathode made by the Pechini method, supported on steel AISI-SAE 316, illuminated with two lamps of high pressure mercury of 125W and 250W.

The results showed that the optimal concentration of alcohol in the system is 10% v / v of methanol, ethanol and glycerol. A significant increase of temperature causes the amount of hydrogen produced is lower, though the light power is higher. The optimal number of layers decreases by increasing of alcohol chain, and the hydrogen production was affected by parallel reactions that used the flow of electrons to their generation, also showed no significant differences between the alcohols due probably to the short working time and low concentration of alcohol.

---

<sup>\*</sup> Degree Project.

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Dr. Julio Andrés Pedraza Avella. Codirector: Dr. Dionisio Laverde Cataño. Santander Industrial University.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles, a pesar de su fácil acceso y ventajas para el transporte y almacenamiento, son recursos no renovables que causan un grave impacto en el ambiente [1]. Lo anterior, motiva a investigar y desarrollar nuevas fuentes de energía que sean de fácil renovación y brinden menos daños a nuestro hogar: la tierra.

Una de las alternativas propuestas es la utilización del hidrógeno como fuente de energía, ya que su poder calorífico estimado es mucho mayor (120161 KJ/Kg) frente al de la gasolina (44170 KJ/Kg). Para su utilización en celdas de combustible se requiere que este sea de alta pureza y esto se consigue mediante electrólisis. Sin embargo, este proceso es costoso y se busca minimizar sus costos asistiéndolo con luz. Además, se aumenta la eficiencia optimizando las variables que influyen en el proceso: dimensionamiento de la celda, electrodos y agentes de sacrificios.

Si además de producir hidrógeno, se eliminan subproductos de procesos industriales como algunos componentes orgánicos en las celdas fotoelectrolíticas, se brinda un doble beneficio garantizando una remediación ambiental. Investigaciones actuales demuestran una eficiencia considerable en la oxidación de cadenas cortas de alcoholes, polioles y azúcares; utilizando baja energía solar o artificial para producir electricidad, purificando el agua y obteniendo hidrógeno [2].

En el presente trabajo se evaluó la producción de hidrógeno a partir de soluciones acuosas orgánicas: metanol, etanol y glicerol. Estos alcoholes constituyen sustancias derivadas de la biomasa (etanol) o subproducto del biodiesel (glicerol), que se pueden aprovechar en las celdas fotoelectrolíticas buscando la conservación del medio ambiente. Para mejorar el sistema también se evaluaron

las siguientes variables: material del soporte, concentración del alcohol, potencia lumínica y número de capas del fotoánodo.

Los resultados revelaron que al utilizar sustancias orgánicas (metanol, etanol y glicerol) y el sistema fotoasistido aumentó en un 42.4% la producción de hidrógeno comparándolo con la electrólisis.

Se encontró que las condiciones óptimas para lograr una mayor eficiencia en la producción de hidrógeno fueron: acero inoxidable AISI-SAE (SS) 316 como sustrato, concentraciones de 10% v/v para cada alcohol y un solo recubrimiento de  $\text{TiO}_2$  en el electrodo que cumple la función de ánodo.

Además, se encontró que al usar una lámpara de alta presión de mercurio UV-VIS de 125 W la producción de hidrógeno es máxima con el glicerol y al utilizar la lámpara de 250 W el metanol da mejores resultados. Aunque no se observó una diferencia importante entre los diferentes alcoholes evaluados, los mejores resultados se obtuvieron con glicerol.

## 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

La creciente demanda energética mundial, el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y los problemas ambientales que están azotando el planeta, han promovido la exploración de nuevas alternativas energéticas que sean más limpias y renovables. Por esta razón, hoy día se vislumbra el hidrógeno como la principal fuente de energía a nivel mundial, debido a su alto poder energético y las implicaciones ambientales favorables que conllevan a su utilización [3,4].

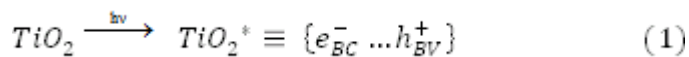
Actualmente el hidrógeno se puede obtener en gran parte por procesos industriales a partir de hidrocarburos (reformado de metano con vapor para refinación y petroquímica; pero sin la pureza necesaria para utilizarse en una celda de combustible), también por descomposición térmica del agua y por electrólisis del agua, siendo estos procesos costosos por los requerimientos energéticos que necesitan. Por este motivo uno de los retos tecnológicos del siglo XXI es una producción más económica de hidrógeno de alta pureza.

Una de las soluciones a este problema es un proceso que combine la fotocatalisis con la electrólisis, es decir la fotoelectrólisis (electrólisis fotoasistida), en donde se usa un fotoánodo y un cátodo, que en contacto con el electrolito, forman el circuito eléctrico a través del cual pasa la corriente y reduce los iones presentes. En este proceso es necesario el uso de agentes de sacrificio (por ejemplo, sustancias orgánicas como los alcoholes) que consuman los huecos fotogenerados para aumentar la velocidad de oxidación de la sustancia del ánodo (alcohol) y la reducción de hidrógeno no esté limitada en el cátodo. Así, se aumenta la pureza del hidrógeno obtenido y se disminuyen los costos de operación.

Este estudio empezó con el rompimiento foto-inducido del agua descubierto por Fujishima y Honda en 1972, quienes observaron que el agua podía disociarse usando un electrodo de  $\text{TiO}_2$  como ánodo, el cual era iluminado (fotoánodo), y un electrodo de platino como cátodo [5]. Desde entonces esta reacción ha sido

estudiada con gran interés en los campos de la electroquímica, la fotocatalisis y la química de los materiales [6, 7, 8].

Los procesos fotocatalíticos son posibles gracias a las propiedades semiconductoras de algunos materiales, que al ser excitados con radiación de cierta longitud de onda se produce la absorción de fotones y la generación de pares electrón-hueco promoviendo así reacciones de oxido-reducción en su superficie. El  $TiO_2$  ha sido el fotocatalizador más ampliamente utilizado debido a su notable fotoactividad, estabilidad, no toxicidad y bajo costo [9,10]:



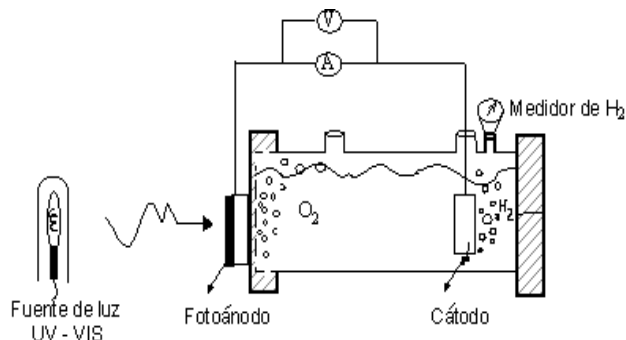
Simultáneamente, en presencia de una fase adsorbida (reactivos líquidos o gaseosos), se produce una transferencia de electrones hacia las moléculasceptoras (que se reducen) o desde las moléculas donoras (que se oxidan), de acuerdo al potencial redox de cada especie [11,12].

## 2.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR SOLUCIONES ORGÁNICAS

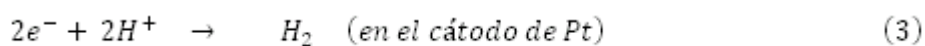
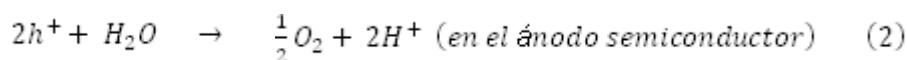
La mayoría de los residuos orgánicos son ricos en hidrógeno, por esta razón la ruptura de sustancias derivadas de la biomasa, como etanol o glicerol, son mucho más eficientes para la producción de hidrógeno. Además, estos se encuentran como subproductos en algunos procesos bastante aplicados industrialmente, por ejemplo el metanol se obtiene a partir de gas natural [13], el glicerol en la producción del biodiesel [14] y el etanol que es un producto típico de la fermentación de la biomasa. Para demostrar la eficiencia del hidrógeno sobre el etanol se hace una comparación entre sus poderes caloríficos. En un kilogramo de etanol hay un porcentaje del 13% de hidrógeno.

En la producción fotoelectrolítica de hidrógeno se usa un semiconductor que es depositado en un electrodo (ánodo) conectado externamente con un electrodo de platino (cátodo). El sitio de la evolución molecular del hidrógeno está

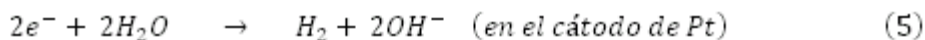
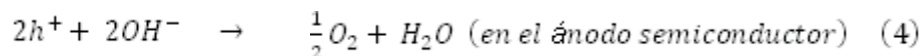
espacialmente separado del sitio de oxidación de la sustancia sacrificada [15, 16] (ver Figura 1).



**Figura 1.** Esquema de una celda electroquímica para la producción fotoasistida de hidrógeno [15] Las reacciones específicas que ocurren sobre los electrodos son dependientes del pH así, en medio ácido:

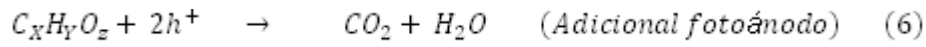


Mientras que en medio básico:

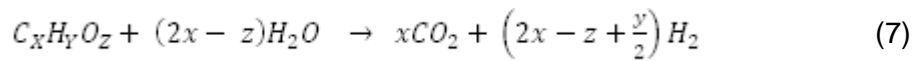


Teniendo en cuenta que estas dos reacciones conjugadas deben ocurrir simultáneamente y que la Ec. (5) es muy lenta, la producción de  $H_2$  se ve limitada. El empleo de agentes reductores de sacrificio (donores de electrones, sustancias que se oxidan fácilmente: metanol, etanol y NaCN) muestra un aumento considerable en la cantidad de hidrógeno producido, pues implica una reacción anódica adicional que aumenta el flujo de electrones hacia el cátodo.

Aunque en lugar de la Ec. (5) puede ocurrir una reacción más rápida Ec. (6):



Pero también puede ocurrir la siguiente reacción por la división de las sustancias orgánicas (Ec. 7), generando hidrógeno adicional:

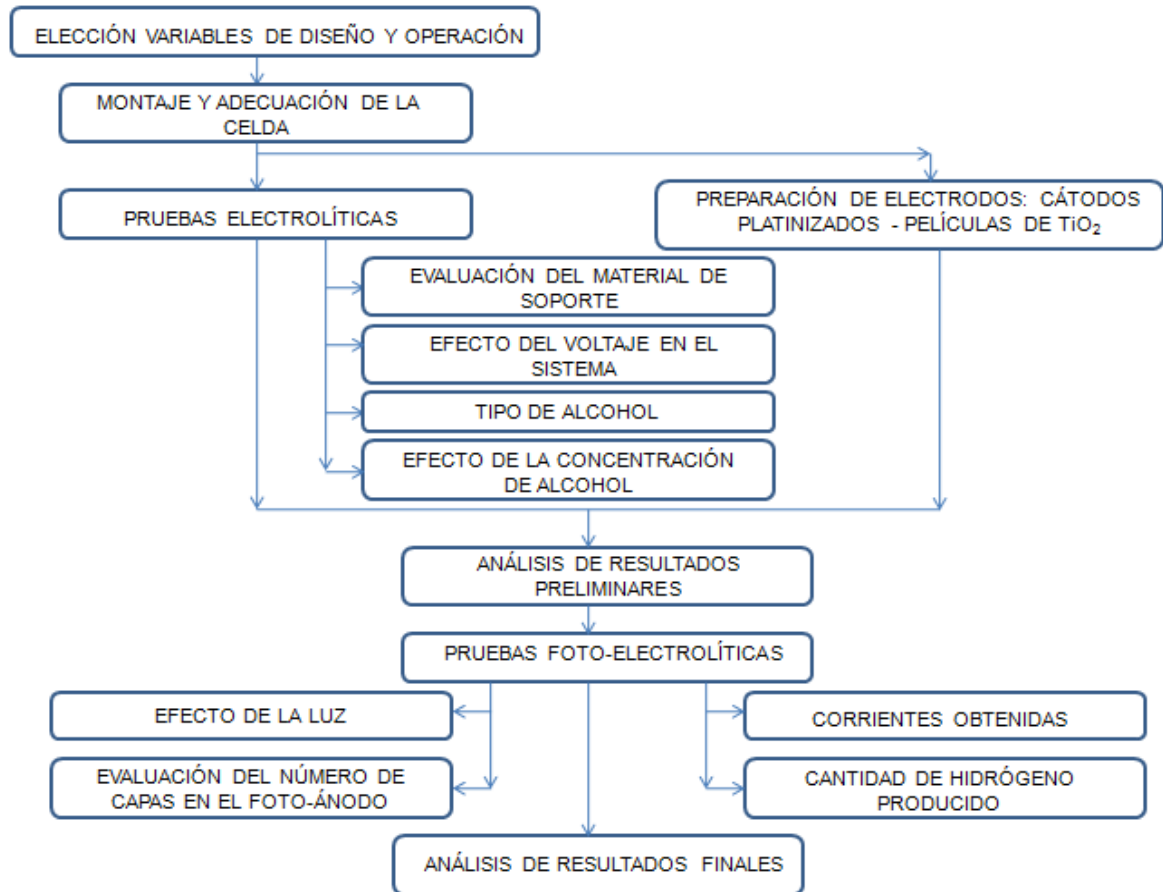


En la universidad industrial de Santander se ha trabajado en la línea de producción de hidrógeno con semiconductores de  $TiO_2$  por el método del Doctor Blade y Pirocloros por el método sol-gel. Como agente de sacrificio se ha empleado cianuro, como electrolito sales de cloruro y la relación área del electrodo/ volumen de electrolito no ha sido la máxima posible en el sistema.

En el empleo de moléculas pequeñas se necesita menos pasos para lograr la oxidación, por este motivo son muy utilizados el metanol y etanol. Sin embargo hay que tener cuidado con la toxicidad del metanol. En este trabajo se considera también el glicerol por ser un desecho de procesos industriales.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El diagrama de bloques de la Figura 2 muestra la metodología seguida durante el desarrollo de este proyecto, incluyendo todas las variables modificadas y estudiadas hasta el análisis final de la cuantificación del hidrógeno.



**Figura 2.** Diagrama de bloques del desarrollo experimental.

#### 3.1 Elección de las variables de diseño y operación

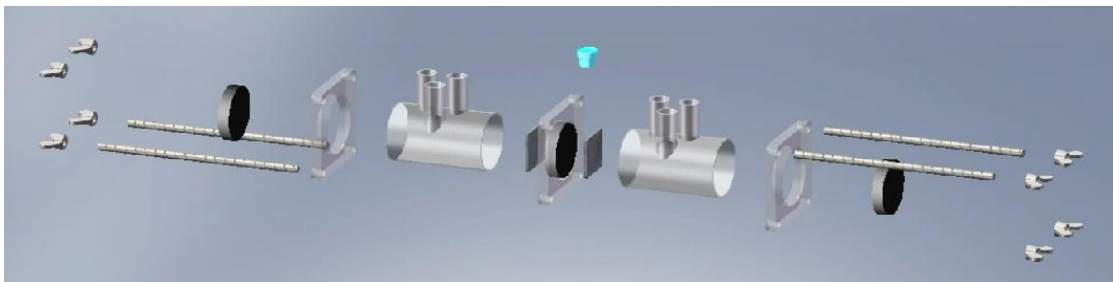
Con base en la literatura consultada y trabajos previos realizados en la UIS se definieron algunas de las variables que conducían a una mayor eficiencia en la celda fotoelectrolítica.

Las variables de diseño estuvieron fijas durante todo el desarrollo experimental y fueron: área de electrodo y volumen de electrólito constante, espacio de cabeza, tipo y área de la membrana de intercambio, disposición y distancia entre los electrodos.

Las variables de operación para encontrar el sistema que produjera la mayor cantidad de hidrógeno son: soporte del ánodo, tipo de cátodo, concentración del electrólito, tipo y concentración del alcohol, voltaje aplicado, potencia de la lámpara y número de capas de  $\text{TiO}_2$  depositadas.

### 3.2 Montaje y adecuación de la celda

Se utilizó una celda foto-electrolítica fabricada en vidrio Pyrex que constaba de un compartimiento para cada electrodo, cada uno con unas dimensiones exteriores de 7cm de diámetro x 7 cm de altura cm. Los dos compartimientos estaban separados por una tapa de acrílico que tenía una membrana de intercambio iónico AMERIDIA NEOSEPTA AMX (área 4 x 4 cm; fuertemente básica; resistencia eléctrica 2.0 – 3.5  $\Omega/\text{cm}^2$ ; resistencia mecánica alta; resistencia al rompimiento  $\geq 3$ ) que evitaba la recombinación de los gases producidos en cada compartimiento (ver Figura 3); todo el sistema se encontraba unido por tornillos asegurados con mariposas.



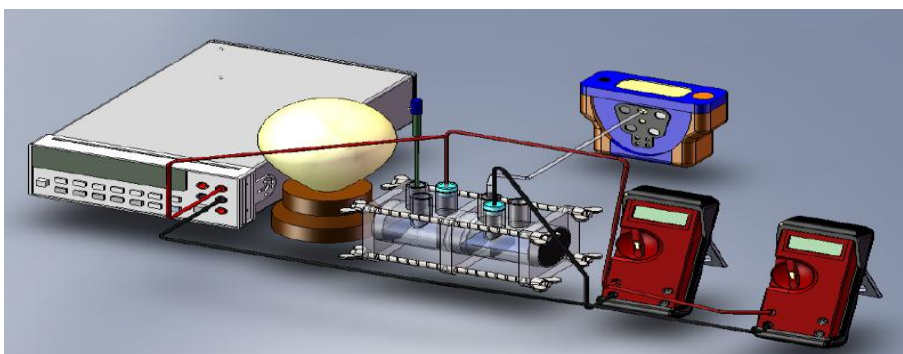
**Figura 3.** Celda fotoelectrolítica utilizada.

El compartimiento catódico contaba con tres bocas, una para introducir el cable conector del cátodo, otra para conectar el medidor de flujo de hidrógeno Crowcon

Tetra gas analyzer (0-1000 ppm H<sub>2</sub>) y la última para la entrada del electrólito. El compartimiento anódico también tenía tres bocas, una para introducir el cable conector del ánodo, otra para introducir la termocupla (SCHOTT Instruments) que permitía monitorear la temperatura y otra para introducir el electrólito que también servía de salida de los gases generados (ver Figura 4). Los electrodos de la celda fueron conectados a una fuente externa de voltaje continuo (Hewlett Packard 17-15-A, 24 V). Los voltajes y amperajes del proceso fueron medidos con multímetros tipo Amprobe 30XR-A digital multimeter.

Para aprovechar al máximo el tamaño de la celda fotoelectrolítica se hicieron ciertas adecuaciones: se igualó el área de la membrana al de los electrodos, facilitando y mejorando el intercambio iónico entre los compartimientos. Los electrodos fueron fijados a la celda usando unas bases en acrílico que impedían su movimiento durante las pruebas y los ubicaba siempre en la misma posición. De esta forma, los electrodos y la membrana quedaban en posición paralela para que el flujo de los electrones fuera continuo y no se alterara el sistema.

La adecuación final fue realizada solo en el compartimiento del cátodo donde se medía el hidrógeno producido; se redujo el espacio de cabeza con un relleno en acrílico, para almacenar el gas en un volumen más pequeño y que la lectura del medidor fuera la más exacta posible.



**Figura 4.** Montaje de la celda fotoelectrolítica para la producción de hidrógeno a partir de soluciones alcohólicas.

### **3.3 Pruebas preliminares**

#### **3.3.1 Evaluación del material de soporte**

Se experimentaron con tres tipos de materiales de soporte para los electrodos: titanio (Ti) (99% pureza), Acero Inoxidable 304 (SS 304) y 316 (SS 316). Además, se utilizó una solución electrolítica de cloruro de sodio a diferentes concentraciones (0.1 M, 0.2 M y 0.3 M), las altas concentraciones garantizaban que el electrólito de soporte mejorará la conductividad.

Cada electrodo tenía una dimensión de 4 x 4 cm y el volumen en cada compartimiento era de 150 mL; garantizando que la relación área del electrodo/volumen del electrólito fuera la más alta posible en el sistema.

Los electrodos de Ti fueron sometidos a un pretratamiento que consistía en una inmersión de las láminas en ácido clorhídrico por una hora a 70 °C y luego un lavado con ácido nítrico por cinco minutos. Mientras que el pretratamiento para las láminas de acero fue un baño ultrasónico eliminando las impurezas que este pudiera presentar.

Inicialmente se evaluó el comportamiento de las láminas Ti y aunque el metal era resistente a la corrosión no brindaba valores de corriente significativos para la producción de hidrógeno. Al evaluar el SS 304 y SS 316 se obtuvieron altos valores de corriente, pero ambos tipos de electrodos se desgastaban rápidamente ya que los cloruros son los principales agentes corrosivos para este tipo de aceros.

Por esta razón el electrólito se definió como una solución de 1500 ppm NaCl y 0.3 M NaOH con base a un trabajo anterior [16]; teniendo en cuenta que la celda debía contar con un pH básico para una duración considerable de los electrodos y además, garantizando que el hidrógeno se produjera por rompimiento del agua o el alcohol y no por la descomposición de ácidos que pudiera tener el electrólito.

### **3.3.2 Efecto del voltaje en el sistema**

Se varió el voltaje del sistema 0.2 V cada 10 minutos, iniciando en 1.5 V y finalizando en 2.5 V. Se evitaron voltajes más altos ya que estos desgastaban las láminas SS rápidamente. Se determinó que el mejor potencial era de 2.3 V.

### **3.3.3 Efecto de la concentración de alcohol**

Definido el voltaje, se realizaron unas pruebas variando la concentración de alcohol para saber en cuál de estas la cantidad de corriente era mayor.

Según Antoniadou et al. [2], el porcentaje óptimo de alcohol en la solución electrolítica es de 20% v/v. Se decidió hacer pruebas por encima y por debajo de este porcentaje con las condiciones de voltaje y concentración del electrolito descritas anteriormente.

## **3.4 Preparación de Electroodos**

### **3.4.1 Preparación de las películas de TiO<sub>2</sub>**

Se prepararon las películas de TiO<sub>2</sub> por el método sol-gel (Ver Anexo A), con las siguientes relaciones, una relación molar isopropóxido de titanio (IV):agua:acetilacetona 1:8:1.5 y una relación volumétrica isopropóxido de titanio (IV):alcohol 1:2.5 [17] con una velocidad de inmersión-extracción de 10 cm/min.

### **3.4.2 Preparación de las películas de acero platinizado**

El platino tiene gran aplicación en la electroquímica debido a su indiferencia al medio de reacción y su alta estabilidad, pero es demasiado costoso. Por esta razón, se fabricaron electrodos de platino sobre un sustrato de SS que tuviera las mismas propiedades químicas y electroquímicas del platino puro.

El cátodo platinizado (ver Anexo A) se preparó por el método del precursor polimérico ó de Pechini, utilizando una solución precursora con la siguiente

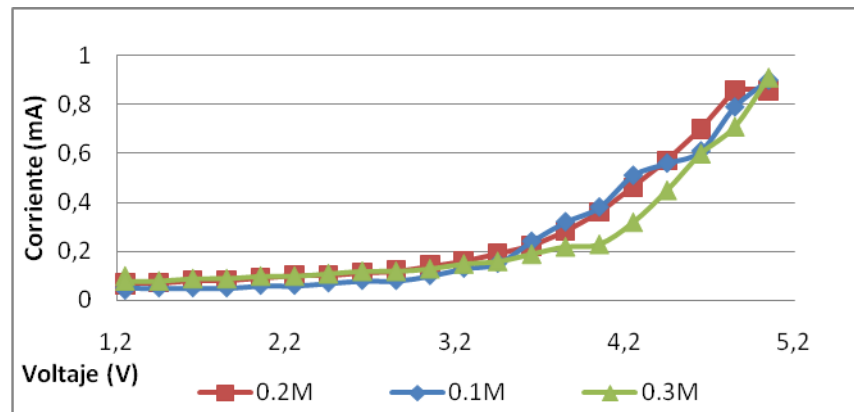
relación molar hexacloruro de platino:ácido cítrico:etilenglicol 1:8:32. El procedimiento para preparar el cátodo fue el siguiente: se pintaron las láminas de acero con un pincel especial de pelos de camello que garantizara la homogeneidad en la pieza, el material se trató térmicamente con dos rampas, la primera a 130 °C por media hora para eliminar el agua y después a 450 °C por diez minutos para eliminar la parte orgánica y así permitir la formación de la película metálica. Este procedimiento se repitió tres veces [18].

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Evaluación del material de soporte

El objetivo de las pruebas realizadas era determinar la conductividad eléctrica de las láminas Ti, SS 304 y SS 316 en función de la concentración de sal, lo cual permitió establecer la susceptibilidad de las láminas a sufrir corrosión.

En la Gráfica 1, se muestra la evaluación de las láminas de titanio; para las cuales se requiere emplear un voltaje mínimo de 2.8 V para producir hidrógeno.

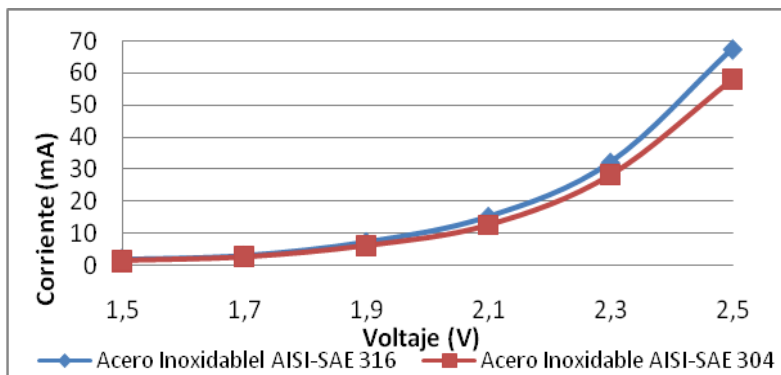


**Gráfica 1.** Corrientes obtenidas en la electrólisis de soluciones con diferente concentración de NaCl, usando láminas de Ti como ánodo y cátodo

Al trabajar con SS 304 y SS 316 bajo las mismas condiciones de concentración (NaCl), el voltaje necesario fue de 1.4 V y la corriente eléctrica fue mucho mayor, pero se presentó una alta velocidad de corrosión en el material. Por esta razón, se cambió la composición del electrolito, empleando la concentración de NaCl utilizada en un trabajo de grado anterior [16] y se descartó el uso de las láminas Ti por el alto voltaje que se debía aplicar al sistema para que se pudiera producir hidrógeno.

Se realizó una evaluación preliminar de los electrodos de SS 304 y SS 316 con la solución de hidróxido de sodio (NaOH) y de cloruro de sodio (NaCl), verificando

que no se presentara corrosión. Se trabajó en un rango de 1.5 V a 2.5 V, mostrando que a voltajes más bajos en comparación al Ti se conseguían altos valores de corrientes. (Ver Gráfica 2).



**Gráfica 2.** Corrientes obtenidas en la electrólisis de una solución con 1500 ppm de NaCl y 0.3 M de NaOH, usando láminas de SS 304 o 316 como ánodo y cátodo.

Se determinó el SS 316 como electrodo de trabajo; porque brindaba mayores valores de corriente, con una cantidad mayor de Cr haciéndolo más resistente a la corrosión. Después de 2.1 V se hacía evidente el aumento de la corriente. Para establecer el voltaje definitivo se realizó el mismo procedimiento con los alcoholes.

#### 4.2 Efecto de la concentración de alcohol

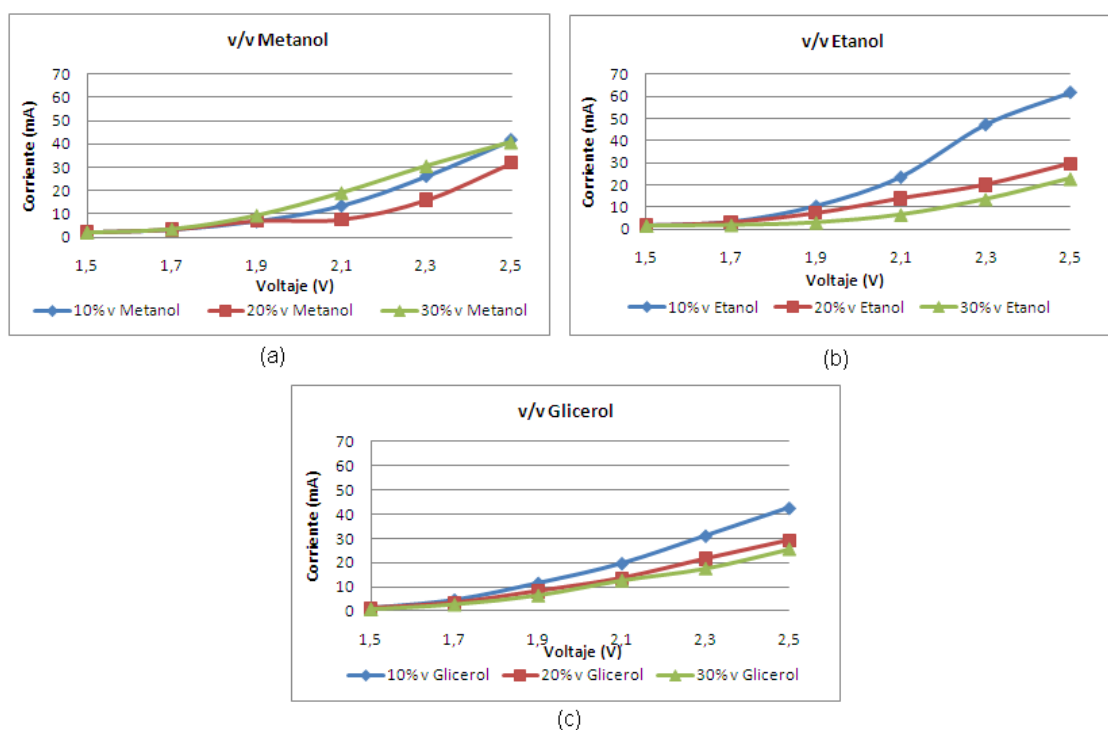
Para la selección de la cantidad de alcohol más adecuada en la celda, se realizó un incremento de voltaje de 1.5 V a 2.5 V, encontrando las condiciones en las cuales se obtuviera una corriente alta.

Debido a la descomposición de los alcoholes decrecen especies no-conductoras que mejoran la conductividad del sistema y aumentan de forma considerable la corriente del sistema. En la Gráfica 3 se muestra el comportamiento de las soluciones orgánicas a diferentes porcentajes en volumen (% v/v).

Como se aprecia en la Gráfica 3, el metanol presentaba la mayor corriente eléctrica con el 30 % v/v, pero se descartó porque la cantidad de hidrógeno que se producía era menor que la producida con el del 10 % v/v de metanol.

Por esta razón, el porcentaje en volumen escogido para las pruebas restantes fue: 10% v/v de metanol, 10 % v/v de etanol y 10 % v/v de glicerol. A estas soluciones se les midió la conductividades eléctricas utilizando un conductivímetro YIS MODEL 35 CONDUCTANCE METER (Ver anexo B).

De la Gráfica 3 también se pudo apreciar que a 2.3 V hay diferencias en los aumentos de corriente eléctrica del sistema, llevando de esta manera al aumento en la producción de hidrógeno y por eso se tomó este valor como el voltaje para la celda.

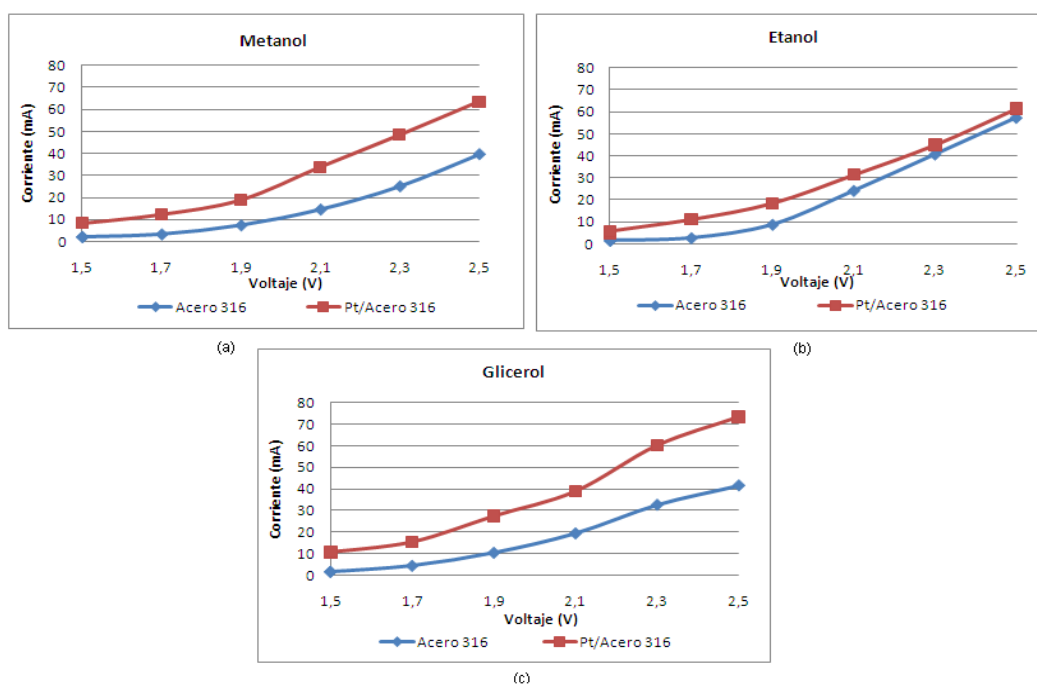


**Gráfica 3.** Corrientes obtenidas en la electrólisis de soluciones con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y diferente concentración de (a) metanol, (b) etanol o (c) glicerol, usando láminas de SS 316 como ánodo y cátodo

El efecto con los diferentes alcoholes es poco significativo ya que evaluados los tres alcoholes, todos conducen a resultados similares de corriente.

### 4.3.1 Evaluación del cátodo

Para evaluar el cátodo hecho por el método del precursor polimérico, se realizaron pruebas con cada uno de los alcoholes, variando el voltaje de 1.5 V a 2.5 V; observando de esta manera un aumento en la corriente eléctrica del 52.6% para el metanol, 24.5% para el etanol y 52% para el glicerol que cuando se usaban electrodos de acero. (Ver Gráfica 4.)



**Gráfica 4.** Corrientes obtenidas en la electrólisis de soluciones con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% v/v de (a) metanol, (b) etanol o (c) glicerol, usando láminas de SS 316 como ánodo y SS 316 o Pt/SS 316 como cátodo

### **4.3.2 Estabilidad de las películas de TiO<sub>2</sub>**

Se examinó el comportamiento de la película de TiO<sub>2</sub> con los diferentes alcoholes a tiempos prolongados, examinándoles su comportamiento (Ver anexo C). De los resultados se eligió como tiempo de trabajo dos horas.

## **4.3 Pruebas fotoelectrolíticas**

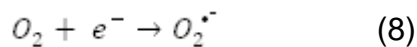
### **4.4.1 Efecto de las lámparas**

Se realizaron pruebas con lámparas de alta presión de mercurio. La primera lámpara UV-VIS utilizada, tenía una potencia de 125 W y aumentaba la temperatura del proceso 7 °C, por esta razón se utilizó un sistema de refrigeración que solo permitía un aumento de 4 °C, observándose que la temperatura tiene un efecto positivo en el sistema incrementando la corriente en un 28% para el metanol, 37.6% para el etanol y un 30.5% para el glicerol.

Cuando el sistema está iluminado el incremento en la producción de hidrógeno es del 39.3% en la solución con metanol, 46.9% para la solución con etanol y 40.8% para la solución con glicerol. Con el sistema de refrigeración la cantidad de hidrógeno disminuye notablemente, demostrando de esta manera que la temperatura tiene un papel importante en la eficiencia del proceso.

La segunda lámpara UV-VIS empleada era de 250 W de potencia, que incrementaba 15 °C la temperatura. Utilizando el sistema de refrigeración la temperatura aumentaba 10 °C. La producción de hidrógeno se mantiene casi igual con luz, sin luz o con refrigeración.

En la Tabla 1 se observó que la densidad de corriente (J) que equivale a la integral de la corriente vs tiempo; en la electrólisis (sin luz), J es menor que las presentadas en la fotoelectrólisis con las lámparas de 125W y 250W. Sin embargo la cantidad de hidrógeno que fue producido no es tan considerable probablemente a la formación del anión radical superóxido Ec 8 que utiliza el flujo de electrones para su generación.

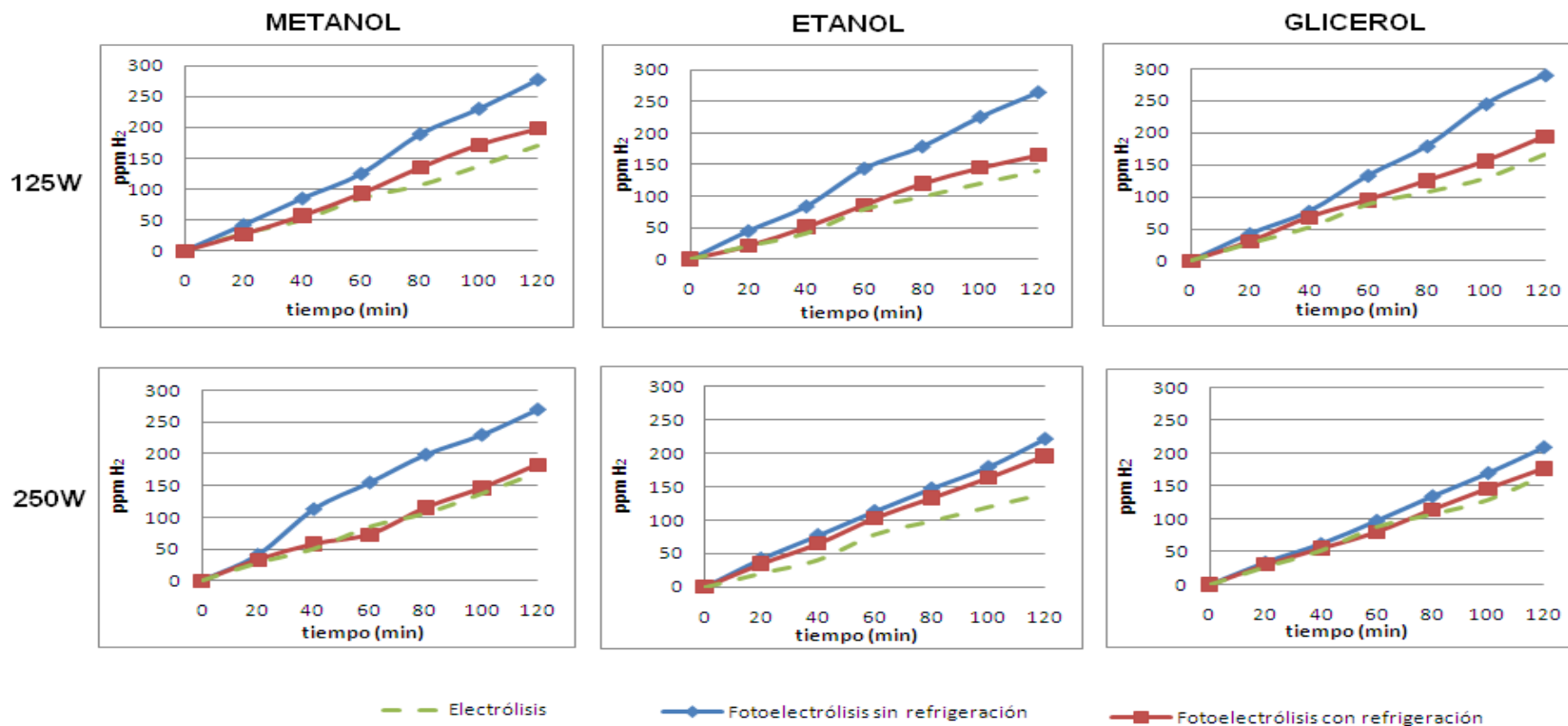


ALCOHOL	SIN LUZ		125 W		250 W	
	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)
Metanol	161,58	1,53	294,23	2,50	436,31	2,43
Etanol	112,10	1,26	377,66	2,39	260,33	1,99
Glicerol	255,33	1,5	482,53	2,61	315,22	1,88

**Tabla 1.** Corrientes promedio obtenidas y cantidad de H<sub>2</sub> producido a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% V/V de alcohol, mediante electrólisis (2.3 V) y fotoelectrólisis (2.3 V, 125 o 250 W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1 capa)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo

El aumento de temperatura por la iluminación tiene un efecto marcado que conduce a un incremento de corriente y de producción de hidrógeno, debido a que un crecimiento pequeño de temperatura hace que el hidrógeno que esta disuelto salga más fácilmente del sistema. Pero si la temperatura aumenta considerablemente, ocasiona probablemente que los alcoholes se evaporen y la absorción ocurra con mayor dificultad. Por esta razón es aconsejable monitorear los deltas de temperatura para que el sistema no tenga costos innecesarios en su operación.

Al comparar la potencia lumínica de las lámparas usadas en el proceso (ver Gráfica 5), se observó que el metanol mantenía una producción casi constante de hidrógeno con las dos, ya que su degradación es más fácil por ser una molécula pequeña.



**Gráfica 5.** Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% v/v de alcohol, mediante fotelectrólisis (2.3 V, 125 o 250 W) con y sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1 capa)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo.

#### 4.4.1 Efecto del número de capas

Se analizó el comportamiento del número de capas (1, 3 y 5) de las películas de TiO<sub>2</sub> en los diferentes alcoholes.

Se espera encontrar un máximo espesor en el cual los electrodos sean aprovechados.

Al hacer las pruebas con la lámpara UV-VIS de 125 W se observó un comportamiento diferente en cada alcohol. Al analizar los valores de J (Tabla 2), se encontró que para el metanol no hay un espesor máximo, debido a la facilidad que presenta esta molécula para oxidarse. En el etanol el máximo es en 3 capas, y para el glicerol en 1 capa.

Esta tendencia se presenta probablemente porque al aumentar el tamaño del alcohol decrece la facilidad que este tiene para oxidarse, disminuyendo el espesor máximo en el cual cada alcohol presenta los mejores valores de corriente.

Sin embargo la cantidad de hidrógeno producido disminuye con el aumento del número de capas, posiblemente por que se esté presentaron reacciones paralelas como la del anión radical superóxido.

ALCOHOL	1 CAPAS		3 CAPAS		5 CAPAS	
	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)
Metanol	294,23	2,50	433,78	2,23	503,75	1,86
Etanol	377,66	2,39	519,25	1,97	302,17	1,97
Glicerol	482,53	2,61	450,08	2,25	342,34	2,15

**Tabla 2.** Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% V/V de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 125 W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1, 3 o 5 capas)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo.

Con la lámpara de 250 W aunque aumenta la potencia el hidrógeno producido es menor respecto a la lámpara de 125 W. Se genera más pares electrón-hueco y pueden emigrar más electrones dentro de la capa ancha, sin embargo las

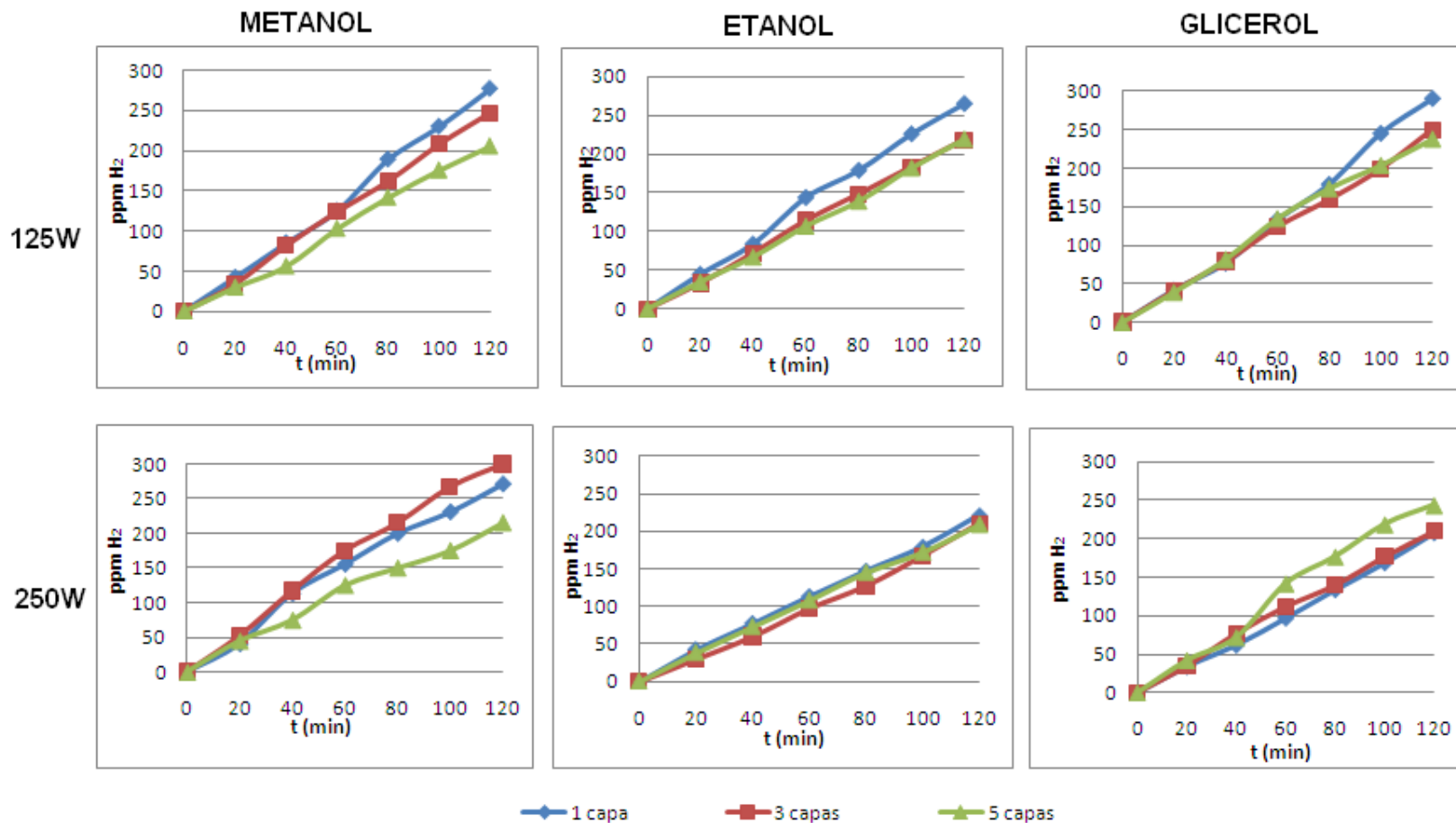
moléculas más grandes son difíciles de absorberse en la superficie del  $\text{TiO}_2$  limitando de esta manera la cantidad de hidrógeno producido (Ver Tabla 3).

En cuanto a los espesores máximos estos aumentan; el etanol pasa a 5 capas y el glicerol a 3 capas. Lámparas más potentes permiten utilizar películas más gruesas pero no se ve una tendencia marcada por los altos deltas de temperatura que se presentan con el uso de esta lámpara y se recomienda trabajar este sistema con refrigeración.

	1 CAPAS		3 CAPAS		5 CAPAS	
	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)	J (mA/Cm <sup>2</sup> )	Cantidad de H <sub>2</sub> (μmol)
<b>ALCOHOL</b>						
<b>Metanol</b>	436,31	2,43	397,48	2,77	460,61	1,94
<b>Etanol</b>	260,33	1,99	292,19	1,89	323,08	1,88
<b>Glicerol</b>	315,22	1,88	339,03	1,89	282,19	2,20

**Tabla 3.** Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% V/V de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 250 W) sin refrigeración, usando  $\text{TiO}_2$ (1, 3 o 5 capas)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo.

En la Gráfica 6 se presenta la concentración de hidrógeno producido con los diferentes números de capas (1, 3 y 5) y con las lámparas de trabajo.



**Gráfica 6.** Concentración de H<sub>2</sub> producido en el tiempo a partir de una solución con 1500 ppm de NaCl, 0.3 M de NaOH y 10% v/v de alcohol, mediante fotoelectrólisis (2.3 V, 125 o 250W) sin refrigeración, usando TiO<sub>2</sub>(1, 3 o 5 capas)/SS 316 como ánodo y Pt/SS 316 como cátodo.

## 5. CONCLUSIONES

La concentración de alcohol (metanol, etanol y glicerol) para lograr una máxima producción de hidrógeno fue 10% v/v. Un mayor porcentaje de alcohol implica una disminución de la conductividad eléctrica que se traduce como una pérdida de la eficiencia del sistema. No se encontraron diferencias significativas entre los alcoholes probablemente a los tiempos cortos de evaluación y el bajo porcentaje de alcohol.

La producción de hidrógeno no se incrementa al cambiar la lámpara de 125W por la de 250W, posiblemente por el incremento de temperatura, la alta recombinación y las reacciones paralelas.

El número óptimo de capas depende del tipo de alcohol y la potencia utilizada.

## 6. RECOMENDACIONES

Caracterizar los electrodos de TiO<sub>2</sub>/SS y Pt/SS por microscopía electrónica de barrido (para observar morfología, grieta, grosor de película, tamaño de grano o partícula) y difracción de rayos X (para analizar la fase cristalina, la fase estructural y el tamaño de cristal); así como por espectroscopia de impedancia electroquímica para conocer su comportamiento electroquímico.

Utilizar Cromatografía de gases para la cuantificación del hidrógeno.

Comprobar la degradación del alcohol con Cromatografía líquida.

Emplear Atmósfera de nitrógeno para comprobar la competencia con reducción del anión radical superóxido.

Implementar un sistema de vacío que permita retirar y cuantificar el hidrógeno disuelto en la solución acuosa.

Evaluar otro tipo de película para la producción de hidrógeno.

Estudiar el efecto de la temperatura en el sistema.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Vigil. I. Zumeta. J. A. Ayllón. R. Espinosa. Obtención de Hidrógeno por fotólisis: Un reto para la tecnología y ciencia de los materiales. Proceedings of the Hydrogen Energy International Conference. p. 2001-2009, Buenos Aires, Jun. 1998
- [2] M. Antoniadou. P. Bouras. N. Strataki. P. Lianos. Hydrogen and electricity generation by photoelectrochemical decomposition of ethanol over nanocrystalline titania. *Int. J Hydrogen Energy* 33 (2008) 5045-5051.
- [3] B. Johnston. M.C. Mayo. A. Khare. Hydrogen: the energy source for the 21st century, *Technovation* 25 (2005) 569-585.
- [4] A. Midilli. M. Ay. I. Dincer. M.A. Rosen. On hydrogen and hydrogen energy strategies I: Current status and needs. *Renew. Sust. Energy Rev.* 9 (2005) 255-271.
- [5] Fujishima. K. Honda. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature* 238 (1972) 37-38.
- [6] M. Grätzel. Artificial Photosynthesis: Water Cleavage into Hydrogen and Oxygen by Visible Light. *Acc. Chem. Res.* 14 (1981) 376
- [7] A.J. Bard. M.A. Fox. Artificial Photosynthesis: Solar Splitting of Water to Hydrogen and Oxygen. *Acc. Chem. Res.* 28 (1995) 141.
- [8] M. Ni. M.K.H. Leung. D.Y.C. Leung. K. Sumathy. A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using  $\text{TiO}_2$  for hydrogen production. *Renew. Sust. Energy Rev.* (in press).

[9] M.R. Hoffmann. S.T. Martin. W. Choi. D.W. Bahnemann. Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis, Chem. Rev. 95 (1995) 69-96.

[10] J.-M. Herrmann. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. Catal. Today 53 (1999) 115-129.

[11] J.R. Gómez Romero. J.A. Pedraza Avella. S. Castillo Cervantes. M. Morán Pineda. La fotocatalisis heterogénea: Una alternativa promisoriosa para combatir la contaminación ambiental, en: L. García-Collin (Ed.), Contaminación ambiental. El Colegio Nacional, México D.F., 2006 (en prensa).

[12] A.L. Linsebigler. G. Lu. J.T. Yates Jr., Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. Chem. Rev. 95 (1995) 735-758.

[13][http://books.google.com.co/books?id=KBTPxli6IRsC&pg=PA137&lpg=PA137&dq=residuos+de+metanol+en+el+gas+natural&source=bl&ots=8pElm1QVP&sig=ARPFuUS\\_QBZExoN72269uZ4z4c&hl=es&ei=7TL8SqOaJ9LAngejsyOBQ&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=3&ved=0CBAQ6AEwAg#v=onepage&q=residuos%20de%20metanol%20en%20el%20gas%20natural&f=false](http://books.google.com.co/books?id=KBTPxli6IRsC&pg=PA137&lpg=PA137&dq=residuos+de+metanol+en+el+gas+natural&source=bl&ots=8pElm1QVP&sig=ARPFuUS_QBZExoN72269uZ4z4c&hl=es&ei=7TL8SqOaJ9LAngejsyOBQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CBAQ6AEwAg#v=onepage&q=residuos%20de%20metanol%20en%20el%20gas%20natural&f=false)

[14]<http://www.biodisol.com/biocombustibles/expertos-europeos-investigan-para-convertir-la-glicerina-en-metanol-y-reutilizarla-en-la-produccion-de-biodiesel-biocombustibles-medio-ambiente/>

[15] M.I. Litter. Heterogeneous photocatalysis: Transition metal ions in photocatalytic systems. Appl. Catal. B: Environ. 23 (1999) 89-144.

[16] J.L. Hernandez, N. M. Gómez, Diseño, construcción y evaluación de una celda fotoelectroquímica para la producción de hidrógeno, (2008).

[17] E. M. Alvarado. B. M. Vesga. Síntesis de fotoánodos de  $\text{TiO}_2$  sobre vidrio conductor por el método de dip-coating y su evaluación en la remoción fotoelectroquímica de cobre en soluciones acuosas cianuradas. (2008)

[18] R. G Freitas. R.T.S Oliveira. M.C Santos. L.O.S Bulhoes. E.C Pereira. Preparation of Pt thin film electrodes using the Pechini Method. Materials Letters 60 (2006) 1906-1910.

## 8. ANEXOS

### ANEXO A. Electrodo usado en las pruebas foto-electrolíticas



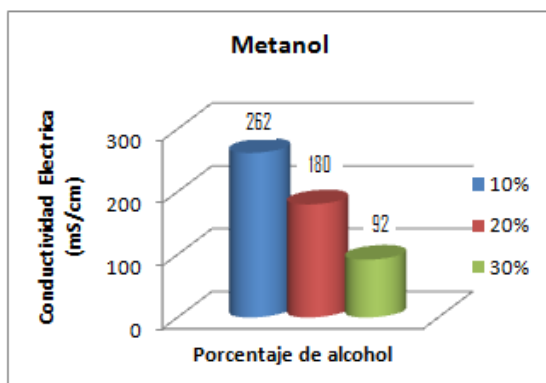
Acero inoxidable AISI-SAE 316 recubierto con  $\text{TiO}_2$



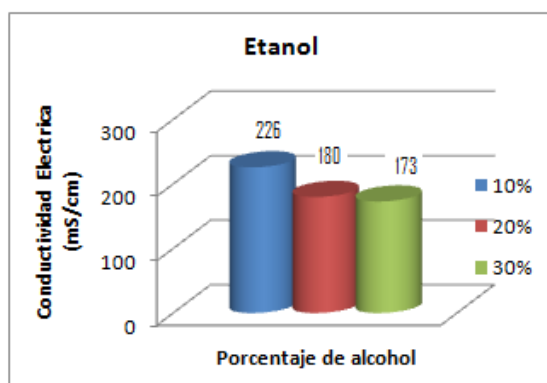
Cátodo platinizado de acero inoxidable AISI-SAE 316

**ANEXO B.** Conductividad eléctrica de las soluciones orgánicas (metanol, etanol y glicerol) a diferentes porcentajes en volumen

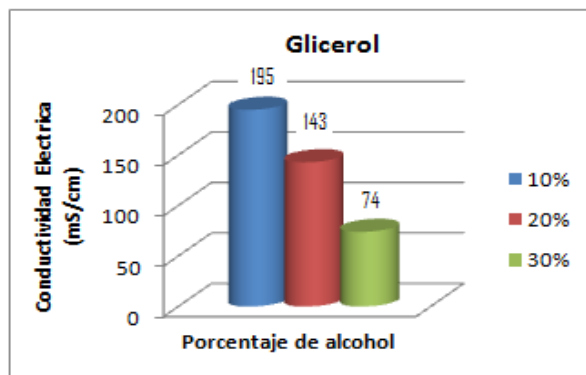
Al agregar las diferentes proporciones de alcohol al sistema, este va perdiendo la conductividad eléctrica debido a que los iones tienden a emigrar, ocasionando de esta manera que las atracciones electrostáticas sean más demoradas.



a)



b)

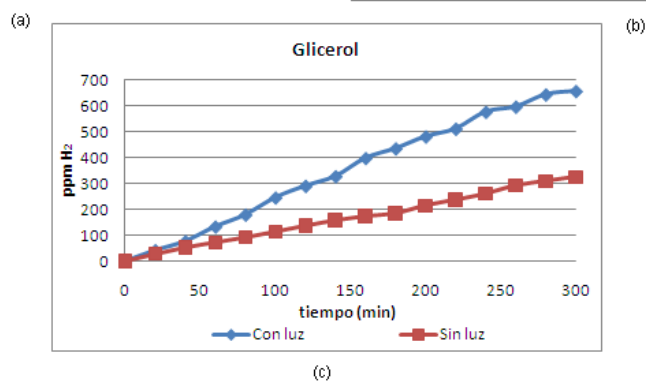
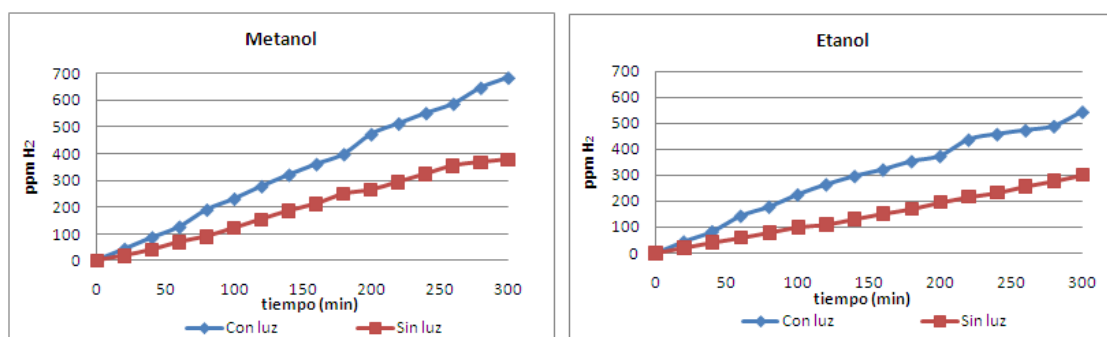


c)

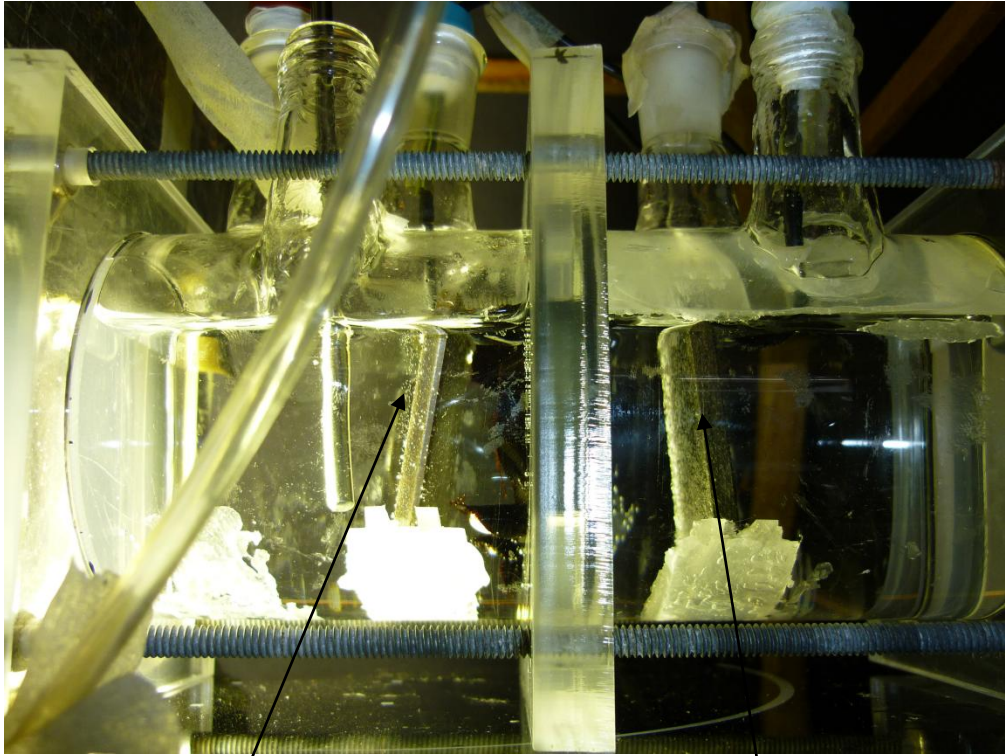
Estos datos fueron obtenidos del conductivimetro YIS MODEL 35 CONDUCTANCE METER

### ANEXO C. Estabilidad de las películas de TiO<sub>2</sub>.

Como se puede apreciar en las gráficas a las 2 horas y 30 minutos la corriente eléctrica del glicerol se mantiene constante, la del metanol empieza a decaer un poco y la del etanol cae significativamente. Este sería el tiempo en el cual se debería trabajar, sin embargo a las 2 horas y 10 minutos de llevarse a cabo la prueba con el glicerol, la solución tomó una coloración amarilla debido al desprendimiento de la película por la presencia del alcohol, impidiendo de esta manera que se aumente la producción de hidrógeno. Por esta razón se escogió como tiempo de trabajo 2 horas para que no se presentara esta situación.



**ANEXO D. Celda foto-electrolítica en funcionamiento**



Zona anódica  
Burbujas de  $O_2$  y  $CO_2$

Zona catódica  
Producción de  $H_2$

**ANEXO E.** Cuantificación del flujo de hidrógeno producido con las lámparas de mercurio de alta presión UV-VIS de 125W y 250 W

Para medir la cantidad de hidrógeno producido en el sistema se utilizó el detector cada veinte minutos, succionando todo el gas presente.

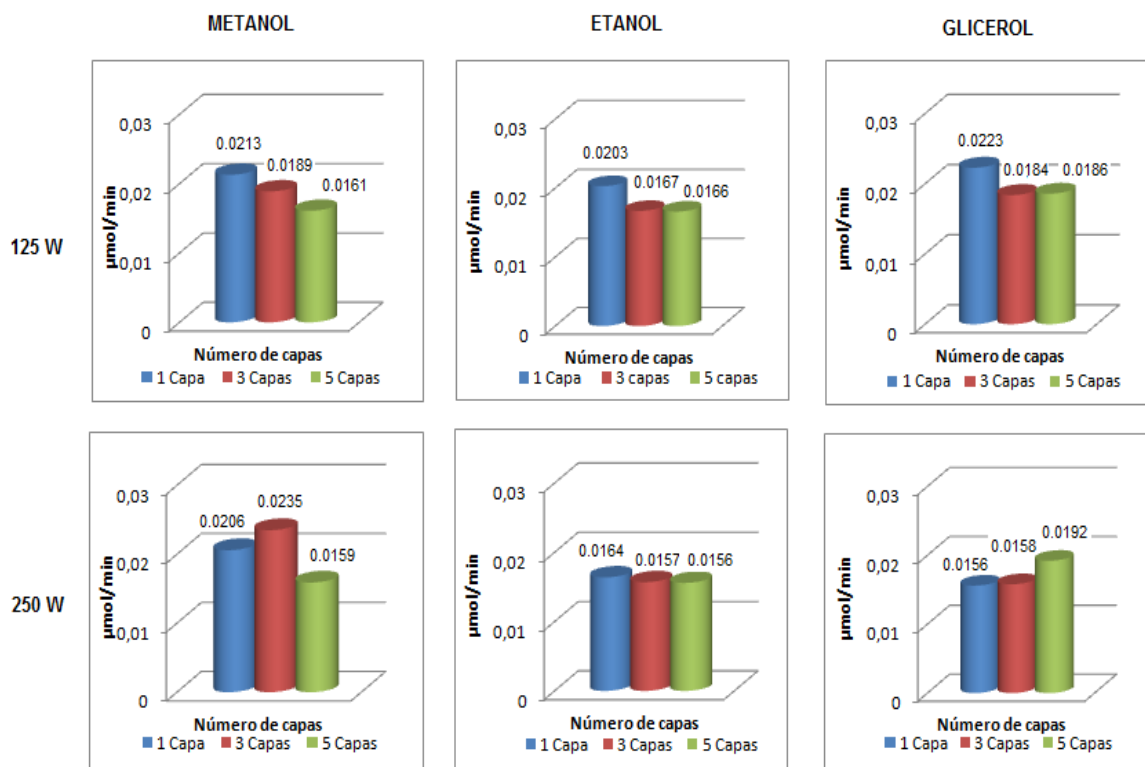
Para la cuantificación del flujo de hidrógeno se cálculo la pendiente de la rectas que era un acumulativo de las partes por millón de hidrógeno generado. El volumen de cabeza de la celda es de 16 mL. Se tuvo en cuenta que en el tope se encuentra presente una mezcla de aire y de hidrógeno.  $1.1359 * 10^{-6} \frac{Kg \text{ aire}}{mL}$ . Se observa los flujos de hidrógeno producidos en los diferentes sistemas utilizados: con diferentes números de capas y lámparas de distinta potencia.

Estos son los flujos de hidrógeno con los alcoholes de trabajo a 125 W

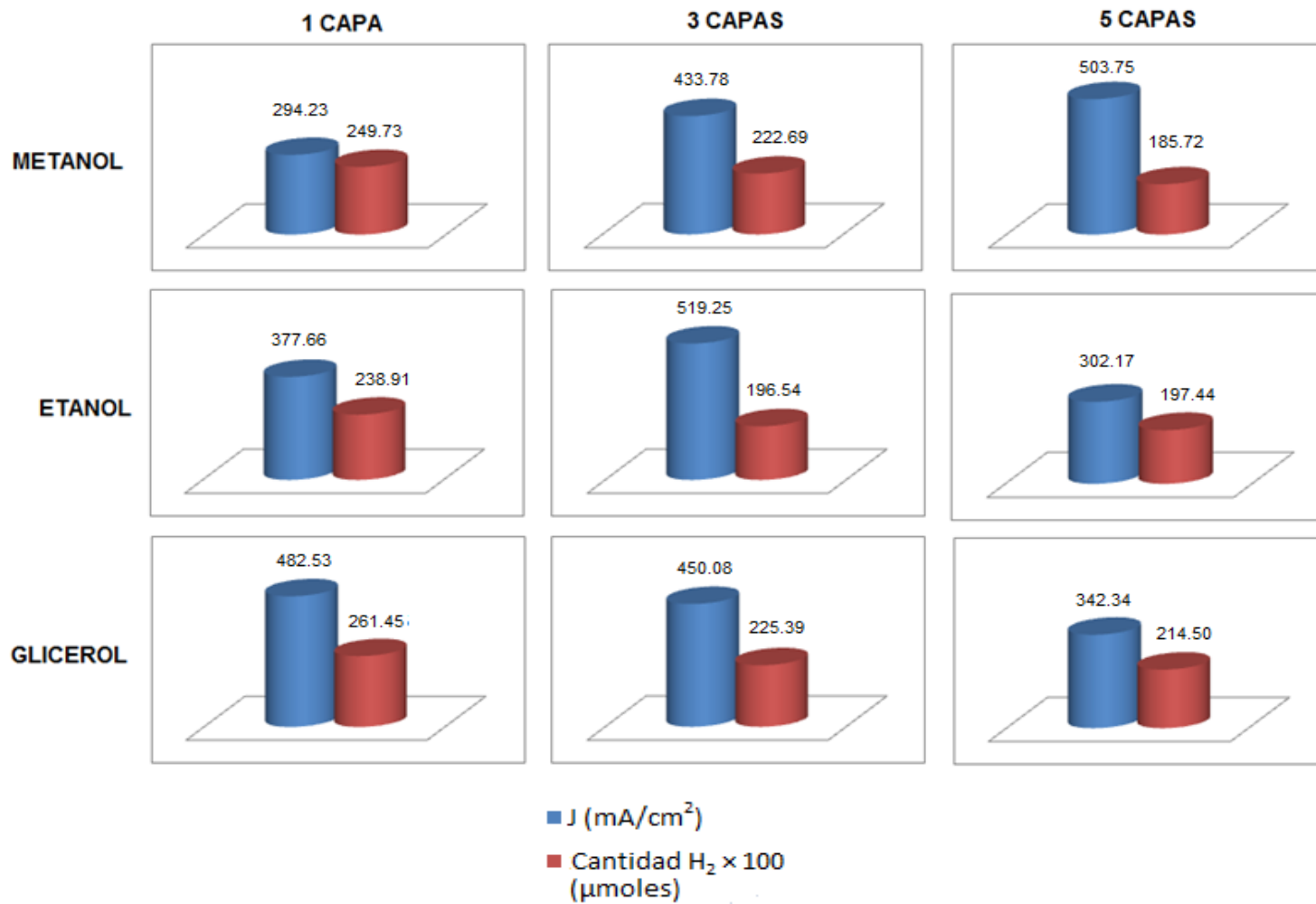
ALCOHOL	No CAPAS	FLUJO ( $\mu\text{mol H}_2/\text{min}$ )
Metanol	1	0,0213
Metanol	3	0,0189
Metanol	5	0,0161
Etanol	1	0,0203
Etanol	3	0,0167
Etanol	5	0,0166
Glicerol	1	0,0223
Glicerol	3	0,0184
Glicerol	5	0,0186

Con la lámpara de 250 W los flujos de hidrógeno producido

ALCOHOL	No CAPAS	FLUJO ( $\mu\text{mol H}_2/\text{min}$ )
Metanol	1	0,0213
Metanol	3	0,0189
Metanol	5	0,0161
Etanol	1	0,0203
Etanol	3	0,0167
Etanol	5	0,0166
Glicerol	1	0,0223
Glicerol	3	0,0184
Glicerol	5	0,0186



**ANEXO F.** Corrientes promedio obtenidas y cantidad de H<sub>2</sub> producida con los diferentes alcoholes, en fotoelectrólisis con la lámpara de 125 W, usando TiO<sub>2</sub> (1, 3 y 5).



**ANEXO G.** Corrientes promedio obtenidas y cantidad de H<sub>2</sub> producida con los diferentes alcoholes, en fotoelectrólisis con la lámpara de 250 W, usando TiO<sub>2</sub> (1, 3 y 5).

