

# Water Splitting Dynamics of High Voltage Pulsed Alkaline Electrolysis

Matías Albornoz, Marco Rivera, Roberto Ramírez, Felipe Varas-Concha and Patrick Wheeler

**Abstract**—The development of high efficiency plasma electrolysis, with the application of pulses of high voltage and extreme short duration to alkaline electrolysis, reveals the characteristics of a new type of water splitting dynamics. Pulses of a width in the nanosecond range are used in the study of the double layer formation of the  $H_2O$  molecules in the interface electrode/electrolyte, corresponding to a capacitive effect depending on the geometry of the electrolysis cell. Varying the frequency, voltage, electrode separation and ionic density of the electrolyte, show responses in the system that introduces the participation of a new type of capacitance in the process, chemical capacitance. This new parameter can guide future studies to understand the mechanics of water splitting under very short pulsed voltages.

**Keywords**—Alkaline-Electrolysis, Capacitance, Cell, Chemical, Electrode, Electrolyte, Frequency, Geometry, Ionic, Pulse, High-Voltage.

## I. INTRODUCCIÓN

LA tecnología predominante utilizada a nivel industrial en la descomposición de la molécula de agua para la producción de hidrógeno mediante electrólisis, se basa en la aplicación de grandes cantidades de corrientes con baja amplitud a un electrolito compuesto de agua con aditivos, método denominado electrólisis alcalina. Para obtener mayor potencia es necesario aumentar el tamaño del dispositivo generador elevando el costo de este. Esta razón, es el principal motivo por el que la producción del hidrógeno se restringe a procesos industriales. Para que la producción de hidrógeno pueda ser más accesible, es necesaria la compatibilidad del proceso con fuentes de energía limitadas, como una micro red solar residencial [1], [2] o un alternador de automóvil [3], [4], además de un equipamiento más económico.

Para optimizar la generación del gas, se busca el desarrollo de métodos contemporáneos que han evolucionado desde la electrólisis DC convencional, nuevas tecnologías permiten la implementación de fuentes de poder avanzadas. El poder pulsado se muestra como una variante prometedora que requiere revisión, esta ha sido ampliamente estudiada en el proceso de electrólisis obteniéndose mejoras de eficiencia del proceso y paralelamente en la formación de plasma [5], otorgando un mayor control en la química de la reacción al modular la frecuencia y duración de los pulsos aplicados. El estudio del poder pulsado ha crecido las últimas décadas gracias a las

exponenciales mejoras en los interruptores de estado sólido, permitiendo obtener un control total sobre las características de los pulsos, reemplazando antiguas tecnologías de conmutación [6]. Estos semiconductores cada vez más pequeños, permiten su implementación en circuitos de menor tamaño y a menor costo, aumentando la densidad de potencia en relación a aplicaciones anteriores.

Se introducen también las descargas de alto voltaje, estas generan un campo eléctrico que es capaz de romper el límite de conductividad en distintos medios fluidos. Al superarse este límite se produce un arco eléctrico donde las cargas encuentran un medio que ofrece conducción con menor resistencia. Esto además de ser utilizado en generadores de plasma, tiene posibles aplicaciones en purificación y descontaminación de agua o aire, según el medio donde se produzca la descarga eléctrica [7], [8]. En experimentaciones con electrólisis de plasma [9], se ha logrado aumentos significativos en la eficiencia de producción del gas que requieren una revisión.

A continuación se realiza un acercamiento práctico sobre la dinámica molecular del agua bajo la aplicación de voltaje pulsado, se busca romper el límite de conductividad de esta para la formación de plasmólisis. Primero se revisa la teoría y el desarrollo actual de las tecnologías empleadas, luego se diseña y construye un sistema para el monitoreo del proceso, junto a una posterior puesta en marcha, para finalizar con un análisis de los resultados. Este trabajo se fundamenta con la intención de disminuir los costos energéticos y de implementación en la producción de hidrógeno, con el fin de acercarlo a las comunidades como una alternativa accesible de combustible.

## II. ESTADO DEL ARTE

### A. Electrólisis

La primera ley de Faraday de la electrólisis postula que, la cantidad de gas producido en la reacción es directamente proporcional a la corriente aplicada sobre el electrolito, en este caso la corriente es aplicada sobre agua. La ecuación (1) relaciona la masa de la sustancia producida  $m$ , con la carga total circulada por el electrolito  $Q$ , la masa molar de la sustancia  $M$ , la constante de Faraday  $F$  y el número de valencia de la sustancia como ion en la solución  $z$ .

$$m = \frac{Q M}{F z}. \quad (1)$$

Al contenedor de electrolito junto a los electrodos se le llama celda de electrólisis (Fig. 1), en ella se tienen dos electrodos, un ánodo y un cátodo conectados a la fuente de

M. Albornoz, M. Rivera, R. Ramírez and F. Varas are with the Faculty of Engineering, Universidad de Talca, Merced 437, Curicó, CHILE. Email: maalbornoz15@alumnos.otalca.cl, marcoriv@otalca.cl, roramirez@otalca.cl, fvaras@otalca.cl.

P. Wheeler is with The University of Nottingham, UK. Email: Pat.Wheeler@nottingham.ac.uk.

poder DC en su configuración más básica. El oxígeno es generado en la superficie del ánodo mientras que el hidrógeno es generado en la superficie del cátodo. Para la situación física específica en estudio, cuando el electrolito al que se le aplica una corriente eléctrica es agua, el voltaje de descomposición es de 1.23V a temperatura ambiente (tensión reversible), también debe aplicarse un sobrevoltaje de aproximadamente 0.4V dependiendo del material de los electrodos, entre otros factores [10]. Con esto se tiene que el voltaje necesario para la descomposición por electrólisis del agua, comienza alrededor de 1.63V (tensión termo-neutral [11]). Para obtener una mayor producción de hidrógeno, bajo esta ley, es necesario aumentar la cantidad de corriente aplicada a la celda de electrólisis. Si se aumenta el voltaje con este fin, se encuentra un límite relacionado con la eficiencia energética, provocado por el efecto de doble capa capacitivo del agua, además de las pérdidas óhmicas [12], [13], [14]. Si se aplica un voltaje mayor a la tensión reversible, la potencia adicional se verá disipada en forma de calor a causa de las resistencias internas de la celda. La tensión reversible, se refiere al voltaje obtenido en el proceso a la inversa, cuando se obtiene electricidad desde la unión de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, por lo tanto es la energía utilizada enteramente en el proceso de producción de hidrógeno y que no se desperdicia como calor. Conociendo este principio, las celdas de electrólisis empleadas actualmente en la industria utilizan voltajes continuos que no sobrepasan los 2V por celda, para evitar una reducción significativa en la eficiencia [10]. Para regular la cantidad de corriente que circula por el electrolito, es posible modificar la conductividad del agua incorporando aditivos en la solución electrolítica, compuestos alcalinos como el hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), entre otros [9], de los cuales el segundo ha tenido un mayor uso por mostrar mejores resultados. Así, es posible aumentar la potencia y producción de hidrógeno evitando superar las tensiones establecidas.

## B. Electrólisis Pulsada

En el instante que se aplica la tensión entre los electrodos, comienza un movimiento interno en las moléculas del electrolito, las moléculas polares del agua son posicionadas de tal manera que sus orientaciones electromagnéticas se ordenan siguiendo el campo eléctrico entre electrodos. Antes de descomponerse, los átomos de hidrógeno de la molécula se acercan hasta al cátodo y los átomos de oxígeno se sitúan en el otro extremo de la molécula, lo mismo sucede en la superficie del ánodo, solo que en la situación inversa. A este efecto se le llama doble capa [12], [15], comportamiento que le da cualidades de condensador al electrolizador. Cuando se forma esta doble capa, los electrones provenientes de la fuente ven limitado su paso hasta el electrolito por las cargas opuestas presentes en las moléculas, estas son ordenadas provocando una barrera de carga eléctrica proporcional a la tensión aplicada en la superficie del electrodo. Aplicar altas tensiones en los electrodos, provoca una mayor resistencia interna del electrolito, lo que explica la disminución en eficiencia antes mencionada.

Este comportamiento particular del agua tarda algunos milisegundos en formarse completamente, por esta razón, si en lugar de una fuente de poder DC, se aplica el voltaje de forma pulsada y con un ancho de pulso de la menor duración posible con los semiconductores disponibles [5], [16], es posible obtener mejoras en eficiencia. Con pulsos de electricidad en el orden de los nanosegundos, la corriente es aplicada a la celda de tal manera que se evita la formación molecular que impiden el libre flujo de electrones, por un instante de tiempo estos son capaces de circular por el electrolito sin la oposición de la doble capa. Los electrones son inyectados en el electrolito y este queda "cargado" con energía almacenada químicamente que es utilizada en la descomposición del agua en el tiempo posterior al pulso. El comportamiento capacitivo de la celda, frente a un voltaje pulsado con frecuencia específica, se puede modelar como un circuito equivalente RC [12], donde es posible encontrar una frecuencia natural para el sistema [17], a esta frecuencia se presentan reducciones en la corriente del sistema, maximizando la salida o producción de gas respecto de la entrada de potencia, resultando en mejoras de eficiencia.

La aplicación de poder pulsado ha tenido varias apariciones en la investigación sobre generadores de hidrógeno, se han podido presenciar algunas mejoras en eficiencia energética del proceso de electrólisis, además de algunos comportamientos que habían pasado desapercibidos en las celdas de electrólisis alimentadas con potencia DC. Una investigación se basó en un circuito generador de pulsos inductivo para suministrar la potencia a una celda de electrólisis [18], con este circuito se comprobó que es posible aumentar la tensión de la fuente sin reducir su eficiencia, o pérdidas resistivas, lo que aumenta directamente la densidad energética del dispositivo. En otro trabajo con electrólisis pulsada [19], Se obtuvieron conclusiones sobre la influencia de la alcalinidad del electrolito, dependiendo de esta, con un voltaje de alimentación de 1V es posible tener pulsos de cientos de volts entre los electrodos, el valor peak de este pulso aumenta a medida que disminuye la conductividad del electrolito, con una resistencia menor,

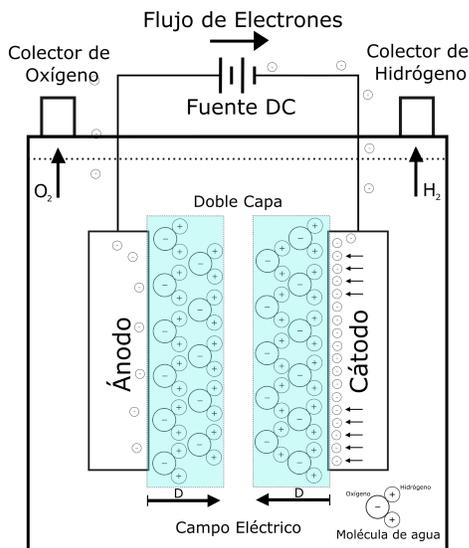


Fig. 1. Celda de electrólisis y formación de la doble capa proporcional al campo eléctrico.

la potencia se ve reflejada en una mayor corriente en lugar de un alto voltaje. También, se pudo apreciar que para pulsos con una duración inferior a  $1\mu s$ , la celda se comporta como un condensador de alta capacitancia, donde el comportamiento de carga y descarga resulta ser dependiente de la conductividad del agua.

### C. Electrólisis de Alto Voltaje

La aplicación de alta tensión a la celda de electrólisis es un área que se encuentra poco estudiada, aunque es posible encontrar algunos autores que han trabajado en el tema [9], [20], [21]. En la situación citada se aplicó un voltaje continuo de 200V DC a un electrolizador, con esto se produjo un aumento en la temperatura que hizo ebullición el líquido en las cercanías de la reacción, junto a un aumento en la producción de hidrógeno como de oxígeno se logró saturar de gas el medio, luego de un punto, cuando la excitación de las cargas alcanza una energía suficiente para saltar al medio gaseoso formado, se produce una descarga de plasma, a causa de esto la corriente disminuye drásticamente sin hacerlo así la producción de gas. La temperatura del electrolizador se estabiliza alrededor de los  $90^{\circ}C$ , entrando en la denominación de plasma frío. Esto considerando la temperatura promedio del electrolito, de todas maneras, la formación de plasma trae consigo la generación de altas temperaturas en el lugar de la reacción, de esta forma, se pueden obtener características de eficiencia de la electrólisis de vapor a alta temperatura (High Temperature Steam Electrolysis [11]), que superan la eficiencia de la electrólisis alcalina de baja temperatura.

Esta situación se presenta en niveles de tensión que pueden variar entre los 200V y 800V [9], [22], [23], dependiendo de la concentración de aditivo en el electrolito y la separación entre electrodos. La electrólisis de plasma presenta una gran ventaja respecto a la electrólisis de bajo voltaje, cuando se conforma un plasma estable en la reacción, se puede observar drásticas disminuciones en la corriente que circula por la celda, sin disminuir el caudal de gas producido. En altos voltajes, los medios gaseosos se comportan como buenos conductores eléctricos, por esto los electrones circulan a través del gas presente entre los electrodos, evitando la circulación por el electrolito que ofrece mayor resistencia. Esta situación muestra que la producción de hidrógeno puede tener características que no responden a la cantidad de carga aplicada sobre el electrolito como se plantea, surgen nuevos fenómenos relacionados con la descomposición del agua por la fuerza del campo eléctrico que precisan de atención. En una investigación

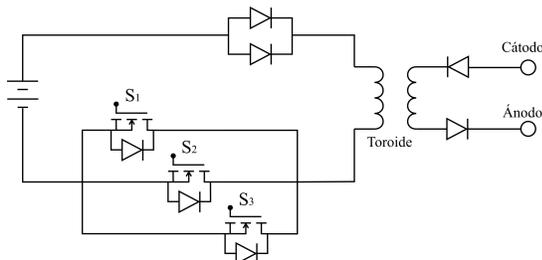


Fig. 2. Circuito esquemático del generador de pulsos inductivo.

realizada sobre electrólisis pulsada [16], se discute sobre la posibilidad de utilizar pulsos de alto voltaje, a una frecuencia suficientemente alta para producir plasma en el electrolito. Con esta tecnología se pueden alcanzar grandes densidades energéticas por breves periodos de tiempo, pudiendo crear generadores de alta potencia y dimensiones reducidas.

Estas tecnologías abren las puertas a la investigación de un nuevo sistema electrolizador, simple de implementar ya que no requiere materiales complejos de alta resistencia térmica o difíciles de adquirir, de bajo costo por su tamaño reducido y alta eficiencia. Existe la posibilidad de aumentar la potencia y frecuencia más allá de los estudios realizados hasta la fecha, donde se han alcanzado frecuencias alrededor de 200kHz [24] y voltajes de 140V [18], buscando llegar al punto de hacer viable la formación de plasma estable. Lograr este objetivo puede hacer posible la implementación de dispositivos generadores de hidrógeno con fines domésticos, como en el almacenamiento de energía y transporte.

## III. GENERADOR DE HIDRÓGENO

### A. Circuito

El circuito de pulsos inductivos de la Figura 2, basado en trabajos anteriores [18], cuenta con una bobina que es magnetizada cuando los 3 switches se cierran permitiendo que circule corriente en el circuito primario, al momento en que los switches vuelven a cambiar de estado se abre el circuito permitiendo la descarga abrupta del inductor. El único camino disponible para la energía almacenada en el campo magnético con esta topología, es ser inducida en el circuito secundario y circulada a través de la carga (celda de electrólisis). Se utilizan 3 mosfet en paralelo para reducir el impacto de la corriente provocando calor en los semiconductores, además se disminuye la resistencia equivalente del circuito, cada switch cuenta con una resistencia interna determinada. La corriente de un inductor está regida por la ecuación:

$$i_L(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} V(t) dt. \quad (2)$$

Esta aumenta en forma de rampa con el tiempo, de manera inversamente proporcional a la magnitud de la inductancia, el campo magnético formado es proporcional a la corriente que lo circula. Para trabajar con altas frecuencias, se necesita una

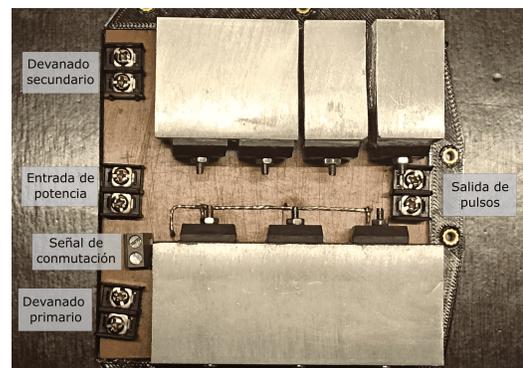


Fig. 3. Circuito generador de pulsos ensamblado.

impedancia relativamente baja, así la corriente puede alcanzar un valor significativo en un corto tiempo, permitiendo una descarga completa y de mayor potencia.

Los diodos en paralelo ubicados en la terminal positiva de la fuente de poder cumplen la función de proteger tanto la fuente como los mosfet del peak de voltaje inductivo producido en el inductor al momento de abrir el circuito. La tensión se presenta en ambos extremos del transformador toroidal, pero por el contrario, la corriente solo tiene salida por el circuito secundario, por esto es necesario evitar que los semiconductores reciban un pulso que sobrepase sus voltajes de ruptura. La función de los diodos en el circuito secundario es evitar la circulación de corrientes inversas, permitiendo el paso de los pulsos de voltaje con una polaridad definida, y no así corrientes alternas. La construcción del circuito se realizó sobre una placa de cobre donde se situaron solo los semiconductores de estado sólido (Fig. 3), las bobinas, generador de señal y driver actuador fueron implementados por separado para obtener un diseño modular que facilite modificaciones.

### B. Celda de Plasmólisis

Una celda de electrólisis de plasma pulsada, cuenta con básicamente los mismos componentes que una celda de electrólisis convencional, las principales diferencias son la disposición y tamaño de los electrodos (Fig. 4). En este caso los electrodos tienen una forma de punta de aguja, con esto se busca limitar el área superficial al mínimo, reduciendo la capacitancia eléctrica para trabajar con altas frecuencias, y además concentrar la potencia del campo eléctrico en un punto en específico. La formación de plasma requiere una alta densidad energética, y la geometría de los electrodos influyen en la forma del campo eléctrico que se produce entre dos conductores de polaridad opuesta. Con un campo eléctrico concentrado en un punto pequeño se espera localizar una gran producción de gas, que sería el medio para la formación de plasma. El armazón de la celda construida para este estudio está hecha con una resina UV utilizada en la impresión 3D con tecnología LCD, esta resina es capaz de soportar temperaturas alrededor de los 200°C. Se dispone de tres ventanas para observar la reacción al interior de la celda, construidas de vidrio de 4mm de espesor fijadas a la base con silicona estructural. Los electrodos corresponden a pernos de acero inoxidable fijados mediante un hilo interno impreso

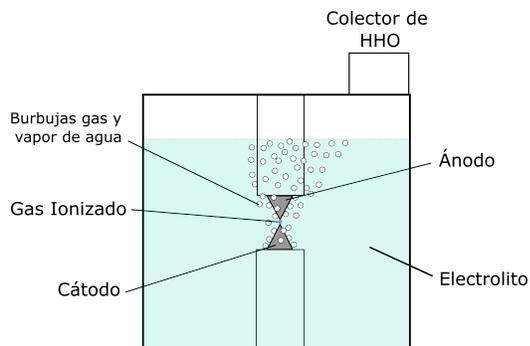


Fig. 4. Diagrama celda de plasmólisis pulsada (vista frontal).

como parte del armazón de la celda, el extremo se encuentra lijado en forma de punta de aguja. Para ajustar la separación entre electrodos basta con girar los pernos hasta la posición adecuada.

## IV. EXPERIMENTACIÓN

En este estudio, es necesario contener el volumen de gas producido para poder cuantificarlo, el volumen de gas utilizado para los cálculos será la totalidad del gas producido en la reacción de descomposición de la molécula de agua, dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno, a este gas que contiene ambos elementos se le denomina oxihidrógeno o HHO. La presión acumulada de gas provocará un aumento en la altura de la columna de agua al interior de una manguera transparente, este aumento será medido gracias a una regla ubicada en paralelo a la manguera que contiene el agua, similar a un nivel de agua simple (Fig. 5). Luego de tomar los datos, la presión es liberada mediante una válvula de despiche ubicada en la tapa del burbujero. Para obtener una caracterización de esta celda se revisará la respuesta de ésta a una serie de frecuencias, voltajes, electrolitos y separación entre electrodos. El electrolito con el que se realizará la caracterización principal será agua potable sin aditivos, luego se utilizan los parámetros más relevantes para realizar la comparación con otros electrolitos. La primera serie de pruebas realizadas sobre la celda de electrólisis consiste en variar la frecuencia del pulso de voltaje entregado, para esto se mantiene constante el voltaje de la fuente de poder así como también se mantiene la separación entre electrodos. La producción graficada es calculada con la potencia entregada por la fuente de poder, se evalúa la eficiencia del proceso sin analizar la eficiencia del circuito propiamente. En el gráfico de barras de la Figura 6, se muestra la producción de HHO en mililitros por watt de potencia en relación con la frecuencia del pulso, se puede apreciar una clara tendencia de aumento en la eficiencia del proceso a medida que se aumenta la frecuencia. Esta información permite intuir la posibilidad de evitar trabajar con

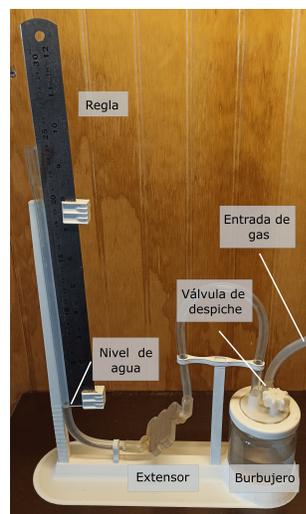


Fig. 5. Sistema de mediciones ensamblado.

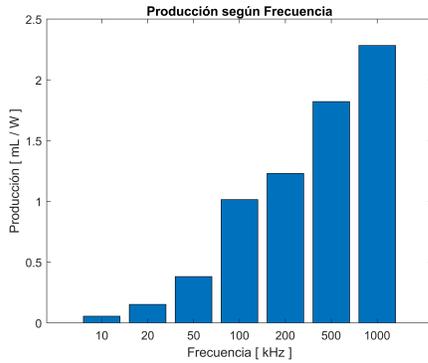


Fig. 6. Producción de gas según frecuencia del pulso aplicado, con 4V en la fuente y separación de 0.1mm entre electrodos.

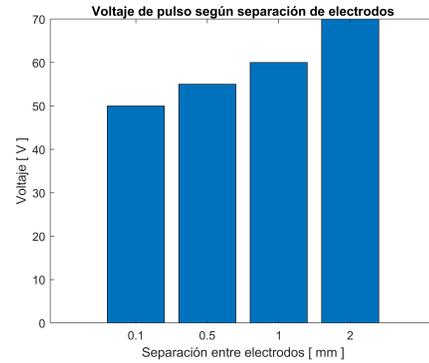


Fig. 8. Voltaje de pulso obtenido según separación entre electrodos, con 4V en la fuente y frecuencia de pulsos de 1MHz.

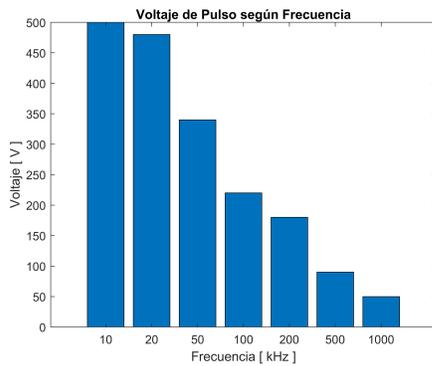


Fig. 7. Voltaje de pulso obtenido según frecuencia de aplicación, con 4V en la fuente y separación de 0.1 mm entre electrodos.

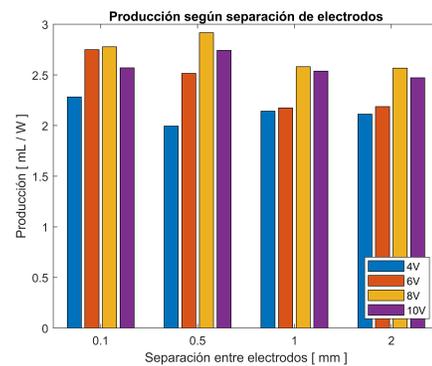


Fig. 9. Producción de gas según separación entre electrodos, con una variación de 4 a 10V en la fuente de poder y frecuencia de pulsos de 1MHz.

frecuencias demasiado bajas, ya que no entregan datos relevantes para el resto de la investigación sobre la eficiencia del proceso. Al observar los datos de voltaje de pulso, obtenidos con el experimento anterior, manteniendo la separación entre electrodos de 0.1mm y la tensión de 4V en la fuente de poder, se puede observar una variación en el voltaje máximo del pulso que responde de manera inversamente proporcional al aumento en frecuencia (Fig. 7). El comportamiento del circuito está definido principalmente por la naturaleza del inductor presente, el experimento varía la frecuencia de los pulsos, en cambio la duración de estos se mantiene. Cuando se tiene una baja frecuencia en la repetición de pulsos, con una duración que ronda los 200 nanosegundos, resulta que el inductor tiene un mayor tiempo de carga por ciclo, se acumula mayor energía en comparación a la misma situación con una mayor frecuencia. Cuando el inductor tiene exactamente la mitad de tiempo para juntar energía, se obtiene como es de esperar, la mitad de voltaje en el pulso. Un comportamiento del proceso no tan evidente o intuitivo que toma lugar en el electrolito frente a un pulso de voltaje, es la incidencia de la separación entre electrodos. La Figura 8 muestra una tendencia de aumento de voltaje proporcional al aumento de distancia entre electrodos.

Fue establecido que el voltaje del pulso depende parcialmente de la resistencia del circuito. Cuando la energía acumulada en el inductor en forma de campo magnético se descarga de manera abrupta, y el circuito tiene baja resistencia,

la potencia puede fluir con una alta corriente, el voltaje varía su intensidad según la corriente para mantener la relación de potencia. Si se aumenta la distancia que debe transitar la corriente dentro del electrolito, se ve directamente aumentada la resistencia del circuito, resultando en un mayor voltaje, a diferencia de cuando los electrodos están más cerca entre sí o en una configuración de menor resistencia. Luego de revisar la influencia de la frecuencia y resistencia en el proceso, se introducen los posibles efectos de la capacitancia, que en un entorno dominado por frecuencias tiende a producir fenómenos de resonancia. La celda de electrólisis tiene una composición que es básicamente la de un condensador, se tienen dos electrodos separados por un electrolito, la capacitancia en estos componentes aumenta a medida que crece el área superficial de los electrodos y se disminuye la separación entre estos. En este caso los electrodos fueron optimizados para concentrar el campo eléctrico con una forma de punta de aguja, dejando solo una variable para controlar la capacitancia de la celda, la separación de electrodos. Siguiendo esta analogía, si los electrodos se alejan, la capacitancia disminuye, cambiando la frecuencia de resonancia del circuito. Un condensador con una menor capacitancia tiene un menor tiempo de carga y descarga, por ende es capaz de trabajar a frecuencias más elevadas sin mantener un voltaje “constante”. La Figura 9 muestra la producción en relación a la separación entre electrodos, junto con una variación en los voltajes de

la fuente de poder. El gráfico comienza con un mínimo de 4V, al usar tensiones menores, la producción es demasiado baja para obtener resultados comparables y sería necesario extender demasiado el tiempo de experimentación. Para los voltajes de 4V y 6V, la mayor producción se encuentra cuando los electrodos están muy cerca entre sí, a medida que se alejan la producción disminuye. Es distinto en el caso de voltajes más elevados, para 8V y 10V el pick de producción se encuentra en 0.5mm, una separación ligeramente mayor. La diferencia fundamental del proceso de electrólisis pulsada con la electrólisis convencional, es que al aplicar pulsos extremadamente rápidos, la corriente es capaz de ingresar al electrolito antes de que se produzca la descomposición de la molécula de agua, la descomposición continúa hasta después de terminado el pulso. Pero se vislumbra que, dependiendo del electrolito, hay un límite de cuanta energía puede ser ingresada y acumulada químicamente en el líquido. Se debe diferenciar entre dos comportamientos capacitivos presentes en la celda de electrólisis. Uno es la capacidad de almacenar o acumular energía química en el electrolito, posterior al pulso esta energía es utilizada para descomponer las moléculas de  $H_2O$ , a esta se le referirá como capacidad química. El otro comportamiento capacitivo es la propiedad física que tienen dos conductores bajo una diferencia de potencial, representada por los electrodos posicionados muy cerca entre ellos, esta característica es disminuida al utilizar electrodos con punta de aguja, este principio es el causante de la doble capa. Aplicando la teoría del capacitor a la celda de electrólisis, se tiene que en cada pulso de voltaje se le inyecta una cierta cantidad de corriente a la celda, esta corriente es mayor cuando así mismo la tensión es mayor. Teniendo en cuenta que el gas o descomposición del  $H_2O$  es producido en las cercanías de los electrodos, se puede plantear una saturación del medio en que se aplica la corriente, en este caso el agua. De esta manera, al aumentar la separación de los electrodos, se ve ampliada la zona disponible para recolectar carga, o podría relacionarse a una capacidad química aumentada volumétricamente. Separar los electrodos trae consigo otros efectos, además de aumentar la capacidad química, se ve reducida la capacitancia eléctrica y también aumenta la resistencia del circuito. La distancia entre electrodos debe estudiarse detenidamente para la frecuencia y voltaje que se desea aplicar en la celda de electrólisis. Durante las pruebas con agua de lluvia como electrolito, este fue el primero en presentar altos niveles de tensión en los pulsos, un par de centenas de volts debido a su baja conductividad. El agua de lluvia, similar en pureza al agua destilada, aunque puede contener minerales o partículas correspondientes a las condiciones ambientales, debido a esto posee una baja concentración iónica que reduce su capacidad química en comparación al agua potable. Alrededor de una frecuencia de 500kHz, una tensión de 10V en la fuente de poder y con una separación de 0.1mm entre electrodos, se alcanzaron pulsos de 430V, lo que originó la formación de chispas eléctricas en la proximidad de los electrodos. Este fenómeno no estuvo presente de manera constante, se exhibía intermitentemente a medida que se formaban pequeñas burbujas que quedaban adheridas entre las puntas de los electrodos, ubicación propicia para la ionización del medio gaseoso, al disminuir aún más

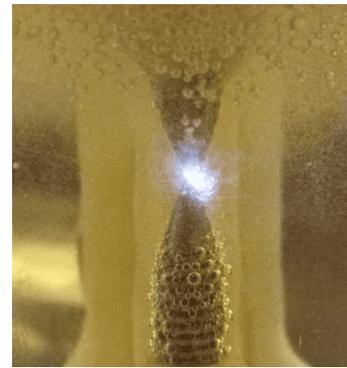


Fig. 10. Formación de plasma al interior de la celda de electrólisis.

la distancia entre estos, fue posible evidenciar la formación de plasma. En el momento de la formación de plasma, se puede percatar que las burbujas de gas comienzan a producirse en mayor proporción directamente desde la zona con gas ionizado. Por desgracia no fue posible la estabilización del fenómeno, los electrodos debían acercarse a una distancia menor a 0.1mm para estabilizarlo por unos segundos, luego de un tiempo se volvía intermitente. Debido a esto no fue posible realizar las pruebas correspondientes de eficiencia en la producción de gas. A pesar del inconveniente, este experimento permitió rescatar información sobre las necesidades que deben ser cubiertas para la formación de plasma estable. Los pulsos deben estar por sobre una tensión 500 volts aproximadamente para esta distancia (menor a 0.1mm), para que el arco eléctrico sea viable a una mayor distancia entre electrodos, el voltaje debe aumentar proporcionalmente. Para que sea posible la formación de plasma en cualquier electrolito, es necesario que el circuito generador de pulsos sea capaz de producir estos con una tensión independiente de la resistencia del medio líquido, es decir, a un voltaje constante. Esto último se puede lograr realizando descargas abruptas e intermitentes desde una fuente de corriente continua estabilizada en alta tensión, posiblemente un condensador de alto voltaje. La tecnología actual permite la implementación de elevadores de voltaje en estado sólido a base de semiconductores que podrían ser idóneos para esta aplicación.

## V. CONCLUSIONES

La electrólisis pulsada ofrece nuevos parámetros para controlar la eficiencia y producción del proceso, lo que a su vez presenta nuevas características que requieren estudio para ser configuradas de manera óptima. La eficiencia de la electrólisis pulsada depende de una marcada separación entre pulsos de voltaje, si se mantiene un voltaje *constante* o cuasi-constante dentro de la celda, sin que el potencial se neutralice entre pulsos, el proceso toma las características de la electrólisis convencional provocando la formación de la doble capa. La energía acumulada químicamente no se refleja en un voltaje observable con los instrumentos de medición, se puede presenciar una saturación de este tipo cuando al aplicar una mayor potencia, aumenta la producción y no así la eficiencia del proceso, inevitablemente, para desarrollar el proceso, este se debe establecer en una capacidad química adecuada o

satisfactoria. El posicionamiento y geometría de los electrodos también resultó afectar esta característica de la celda, la capacitancia química se puede encontrar estrechamente ligada al volumen de líquido en las proximidades de los electrodos. Con las pruebas y experimentos realizados en este estudio, se puede establecer que para lograr una caracterización con mayor profundidad, es necesario contar un sensor de corriente de alta definición, que entregue la capacidad para analizar el pulso de corriente aplicado en la celda. Esta información permite una comparación fidedigna de la energía utilizada en ambos procesos de electrólisis, además de ofrecer más datos que facilitarían la identificación de los parámetros necesarios para una descomposición eficiente del agua. Otro punto importante que permitiría una mejor obtención de resultados, es la implementación de un circuito capaz de entregar un voltaje determinado independiente de la pureza del electrolito, esto permitiría la posibilidad de investigar la formación de plasma en los electrolitos que ofrecen mayor eficiencia en el proceso. Para lograr esto se propone la aplicación de pulsos desde una fuente estable de alto voltaje. Una posible mejora de eficiencia en la generación de hidrógeno, con el simple hecho de modificar las fuentes de poder que actualmente suministran la potencia a los generadores presentes en la industria, podría cambiar radicalmente la economía de hidrógeno. Una mayor producción a un menor costo, significaría un avance significativo para la industria del hidrógeno surgente en Chile y el mundo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Proyecto Fondecyt Regular 1220556 FONDAP SERC Chile N° 15110019 y CLIMAT AMSUD 210001.

#### REFERENCIAS

- [1] Simone Pascuzzi, Alexandros Sotirios Anifantis, Ileana Blanco and Giacomo Scarascia Mugnozza, "Electrolyzer Performance Analysis of an Integrated Hydrogen Power System for Greenhouse Heating. A Case Study", Department of Agricultural and Environmental Science (DiS-AAT), University of Bari Aldo Moro, Italy, 2016.
- [2] Alexandros Arsalis, George E. Georghiou and Panos Papanastasiou, "Recent Research Progress in Hybrid Photovoltaic-Regenerative Hydrogen Fuel Cell Microgrid Systems", *Energies* 15, 3512, 2022.
- [3] Shivaprasad K., Chitragar P., and Kumar G., "Effect of Hydrogen Addition on Combustion and Emission Characteristics of High Speed Spark Ignition Engine - An Experimental Study", SAE Technical Paper, 2015.
- [4] S. Bari, T.J. Dewar, C. Zhang, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine with On-Board Produced Hydrogen-Oxygen Injection", *Thermal Science and Engineering Progress* 32 101317, 2022.
- [5] Felipe Iza, James L. Walsh, and Michael G. Kong, "From Sub-microsecond to Nanosecond-Pulsed Atmospheric-Pressure Plasmas", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009.
- [6] John Mankowski, Magne Kristiansen, "A Review of Short Pulse Generator Technology", *IEEE Transactions on Plasma Science*, VOL. 28, NO. 1, February 2000.
- [7] Mohammad Kebriaei, Abbas Ketabi and Abolfazl Halvaei Niasar, "Pulsed Corona Discharge, a New and Effective Technique for Water and Air Treatment", Department of Electrical Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, I. R. IRAN, 2015.
- [8] Muhammad Arif Malik, Abdul Ghaffar and Salman Akbar Malik, "Water Purification by Electrical Discharges", *Plasma Sources Sci. Technol.* 10, 2001.
- [9] Nelson Saksono, Sutrasno Kartohardjono1, Tiara Yuniawati1, "High performance plasma electrolysis reactor for hydrogen generation using a NaOH-Methanol solution", *International Journal of Technology*, 2016.
- [10] César A. C. Sequeira, Diogo M. F. Santos, "Hydrogen Production", *Ciência Tecnologia dos Materiais*, Vol. 22, n.º 3/4, 2010.
- [11] Md Mamoon Rashid, Mohammed K. Al Mesfer, Hamid Naseem, Mohd Danish, "Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis", *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Volume-4 Issue-3, February 2015.
- [12] Alfredo Ursúa, Pablo Sanchis, "Static-dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser", Department of Electrical and Electronic Engineering, Public University of Navarra, Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, Spain, 2012.
- [13] César A. C. Sequeira, Diogo M. F. Santos, José L. Figueiredo, "Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis", *Quim. Nova*, Vol. 36, No. 8, 1176-1193, 2013.
- [14] Frank Gambou, Damien Guilbert, Michel Zasadzinski and Hugues Rafaralahy, "A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling: Electrical Domain and Specific Electrolyte Conductivity", *Energies* 15, 3452, 2022.
- [15] Mitja Drab, Ekaterina Gongadze, Luka Mesarec, Samo Kralj, Veronika Kralj-Iglic, Ales Iglic "The internal and external dipole moment of a water molecule and orientational ordering of water dipoles in an electric double layer", *Elektrotehniski Vestnik*, 2017.
- [16] Nigel Monk, Simon Watson, "Review of pulsed power for efficient hydrogen production", *Hydrogen Energy Publications, LLC*. Published by Elsevier Ltd. 2019.
- [17] Kaveh Mazloomi, Nasri b. Sulaiman, Hossein Moayedi, "An Investigation into the Electrical Impedance of Water Electrolysis Cells – With a View to Saving Energy", *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012.
- [18] Naohiro Shimizu, Souzaburo Hotta, Takayuki Sekiya and Osamu Oda, "A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply", *Journal of Applied Electrochemistry*, 2006.
- [19] Martins Vanags, Janis Kleperis and Gunars Bajars, "Water Electrolysis with Inductive Voltage Pulses", *InTechOpen*, Chapter 2, 2012.
- [20] K Grosse, V Schulz-von der Gathen and A von Keudell, "Nanosecond Pulsed Discharges in Distilled Water: I. Continuum Radiation and Plasma Ignition", *Plasma Sources Sci. Technol.* 29 095008, 2020.
- [21] A von Keudell, K Grosse and V Schulz-von der Gathen, "Nanosecond Pulsed Discharges in Distilled Water-Part II: Line Emission and Plasma Propagation", *Plasma Sources Sci. Technol.* 29 085021, 2020.
- [22] Nelson Saksono, Rizky Feryanyah, and Setijo Bismo, "Hydrogen Production Using Non-Thermal Plasma Electrolysis in KOH solution", *Chemical Engineering Department, University of Indonesia, Indonesia*, 2011.
- [23] S. Thivya, V. Gowri Sree, "Breakdown Study of Water with Different Conductivities", *Proceedings of 13th IRF International Conference, Bengaluru, India, 24th May 2015*.
- [24] Harirama Dharmaraj, Annadurai, "Energy saving in nano pulsed dc electrolysis for hydrogen production", *International Journal of Environmental Sciences*, 2016.